П. ЛАНЖЕВЕН

ИЗБРАННЫЕ ПРОИЗВЕДЕНИЯ

И * Л

Издательство

иностранной

литературы

*

П. ЛАНЖЕВЕН

ИЗБРАННЫЕ ПРОИЗВЕДЕНИЯ

СТАТЬИ И РЕЧИ ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ НАУКИ

ПЕРЕВОД С ФРАНЦУЗСКОГО
З. А. ЦЕЙТЛИНА

ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ
А. А. МАКСИМОВА

РЕДАКЦИЯ
И. В. КУЗНЕЦОВА

1949

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва

ПОЛЬ ЛАНЖЕВЕН — ФИЗИК-МАТЕРИАЛИСТ

Поль Ланжевен — один из крупнейших физиков современности, выдающийся борец за науку, за демократию, за коммунизм. Он один из лучших представителей передовой зарубежной интеллигенции.

Жизнь и научная деятельность П. Ланжевена замечательно подтверждают правильность прогноза Ленина, сделанного им в его гениальном произведении «Материализм и эмпириокритицизм». Ленин предсказывал, что выход из кризиса физики, в который она впадает в условиях буржуазного общества, лишь один — переход от метафизическо-механистического материализма к диалектическому, т. е. переход к мировоззрению марксизма-ленинизма, переход на сторону коммунизма.

П. Ланжевен совершил этот переход. К концу своей жизни он выступил сторонником диалектического материализма и встал в ряды коммунистической партии Франции. Это — одна из поучительнейших сторон жизни великого французского физика.

Другой поучительной стороной является история тех трудностей, которые встретились на пути Ланжевена к диалектическому материализму.

Французская буржуазия, бывшая когда-то революционной, выдвинувшая в качестве своих идеологов Вольтера, Руссо, французских материалистов XVIII в., к XX в. настолько растеряла свое прошлое культурное наследие и так низко пала в идейном отношении, что передовым людям Франции, подобным Ланжевену, пришлось начинать с чистки авгиевых конюшен господствующего буржуазного мировоззрения.

История жизни и борьбы П. Ланжевена может и должна служить полезным уроком для тех ученых современных капиталистических стран, которые ищут выхода из положения, создавшегося в результате кризиса буржуазного строя, буржуазной науки. Лишь прямое и открытое присоединение к передовому идейному и политическому движению, во главе которого стоит СССР, ускорит выход из того тупика, в который буржуазия завела науку.

* * *

П. Ланжевен родился в 1872 г. в семье парижского рабочего. Ему были близки интересы рабочего класса, интересы трудящихся. О боевых, революционных заслугах парижских коммунаров он узнал из рассказов своих родителей.

В своей ответной речи на праздновании его семидесятитрехлетия, организованном руководством Народного фронта научных работников Франции в 1945 г., Ланжевен с гордостью говорил, что он всю свою жизнь посвятил служению науке и справедливости и что эта его черта объясняется, прежде всего, духом его семьи. Отец, по его воспоминаниям, был республиканцем до мозга костей, а мать — самоотверженной труженицей.

Рассказы родителей П. Ланжевена о героической борьбе парижских коммунаров и кровавой расправе над ними победившей буржуазии внушили ему страстное стремление к социальной справедливости.

Своим упорным трудом Ланжевену удалось пробить себе путь в науку. Благодаря необыкновенным дарованиям и трудоспособности он смог успешно закончить начальную школу, затем школу им. Лавуазье и Школу физики и химии. Последняя соответствовала тому, что у нас носит название техникума. В этой школе учителем Ланжевена был замечательный ученый, педагог и человек, преждевременно погибший физик Пьер Кюри. Школа давала хорошую экспериментальную подготовку.

По окончании Школы физики и химии Ланжевен поступил в 1893 г. в Высшую нормальную школу — своеобразное высшее учебное заведение, где учителями его были известный физик Бриллюен, прививший ему интерес к теоретической физике, и молодой преподаватель Жан Перрен. В Высшей нормальной школе Ланжевен развертывает научно-исследовательскую работу.

В 1897 г., по окончании Высшей нормальной школы, П. Ланжевен получает от города Парижа стипендию для поездки в Англию. В Англии он работал в Кембридже у Дж. Дж. Томсона, познакомился также с Резерфордом и Вильсоном. В этот период он окончательно избрал путь своей научной деятельности.

Вернувшись из Англии, П. Ланжевен становится преподавателем на кафедре физики в Сорбонне (парижский университет), а после защиты в 1902 г. докторской диссертации начал преподавательскую деятельность в Коллеж де Франс. В 1903 г. он заменил Пьера Кюри на должности профессора в Школе физики и химии, где ранее учился сам. С 1905 г. Ланжевен руково-

дит всей учебной жизнью этой школы, а с 1925 г. возглавляет ее в качестве директора; в 1909 г. он становится и профессором Коллеж де Франс. В Школе физики и химии и в Коллеж де Франс у Ланжевена учились — впоследствии ставшие знаменитыми учеными Франции — Фредерик Жолио-Кюри, Жак Николь, Рене Люка и др. В течение 25 лет П. Ланжевен преподавал также в женской школе в Севре.

В 1934 г. П. Ланжевен избирается членом французской Академии наук; в 1929 г. — иностранным членом-корреспондентом, а в 1945 г. — почетным членом Академии наук СССР.

Демократический характер воззрений молодого П. Ланжевена обусловил его выступление на стороне противников «дела Дрейфуса». В дальнейшем, все более убеждаясь в реакционности буржуазии, в ее враждебности подлинной науке, он постепенно переходил на сторону пролетариата. Нет сомнения, что это произошло бы значительно быстрее и Ланжевен пришел бы в ряды борцов за коммунизм раньше, если бы в области философии диалектического материализма он имел такое же научное образование, какое он имел в области физики. Однако марксизм-ленинизм он начал изучать лишь под конец своей жизни.

* * *

Уже в ранних сочинениях П. Ланжевена дается глубокий критический разбор теоретических воззрений и состояния преподавания в области физики.

Одной из работ П. Ланжевена, бросающих яркий свет на его воззрения, является доклад «Дух научного образования», сделанный им в Педагогическом музее в 1904 г., т. е. почти в самом начале его научной деятельности. Те же по существу идеи развил П. Ланжевен и в 1926 г. в статье «Образовательная роль истории науки», воспроизводящей лекцию, прочитанную им в том же Педагогическом музее. В этих двух выступлениях наиболее ярко и сжато отразились главнейшие воззрения П. Ланжевена по вопросам истории науки, по вопросам философии естественных наук и преподавания их в школе.

Характерной чертой воззрений П. Ланжевена является их материалистический характер и антиметафизичность.

В упомянутых нами работах П. Ланжевен исходит из твердого убеждения, что существует внешний мир, независимый от человека и отображаемый в его сознании. Так, в статье «Образовательная роль истории науки» он говорил: «Наша обычная, или эвклидова, геометрия не является единственно возможной и наилучше приспособленной для изображения внешнего мира» (стр. 312). Позднее, в 1938 г., в статье «По-

зитивистские и реалистические тенденции философии физики» он писал: «Трудно быть экспериментальным физиком, не веря в реальность не только других физиков, но и самого мира».

Эти воззрения, бесспорно, лежат в основе всех философских высказываний Ланжевена. Однако как в приведенных, так и в других его работах они формулируются им лишь попутно с разбором естественно-научных проблем или проблем истории науки и не получают четкого выражения и ясного противопоставления идеалистической теории познания.

Наряду с высказываниями, подобными только что приведенным и являющимися формулировкой материалистической теории отражения, у Ланжевена нередко встречаются высказывания о приспособлении мысли к фактам, об обобщении фактов в идеях; причем это имеет место именно в тех случаях, когда нужно было бы недвусмысленно и ясно применять материалистическую терминологию и не давать повода для агностического истолкования этих положений. Иногда, в порядке «ляпсус лингве», Ланжевен допускает даже высказывания о том, что объект есть синтез всех возможных наших ощущений.

Отсутствие ясного представления о существовании двух непримиримых философских лагерей — материализма и идеализма — проистекало у П. Ланжевена из имевшегося в те годы непонимания классовой структуры общества, из непонимания непримиримости классовых интересов пролетариата и буржуазии, проявляющейся и в области идеологии.

П. Ланжевен не понимал тогда противоречий общественного устройства капиталистического общества, хотя повседневно чувствовал на себе последствия этого общественного порядка. Выступая против «дела Дрейфуса» и участвуя в общественной жизни Франции, П. Ланжевен в то же время высказывал ложную идею, будто общество при наличии капитализма может быть однородным. Так, в докладе «Дух научного образования» в 1904 г. он говорил: «Повидимому, научное обучение по своей природе должно быть в той же мере однородным, как и общество, в котором мы живем» (стр. 44).

Лишь революция в СССР, затем поучительная история самой Франции — предательская роль французской буржуазии, капитулировавшей перед немецким фашизмом, оккупация Франции и борьба рабочего класса Франции под руководством коммунистической партии за национальную самостоятельность раскрыли глаза П. Ланжевену, и он сознательно избрал тот путь, к которому стихийно тяготел с ранних лет своей жизни.

П. Ланжевен как материалист, конечно, не мог не видеть враждебных науке выводов того философского течения, которое в книге Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» получило

название махизма. Однако он лишь частично понял опасность и вред этого течения, в чём и проявилась стихийность его материализма.

Так, Ланжевен в общем правильно критиковал Оствальда и Дюгема, приводя, например, выдержку из махистской статьи Оствальда, где говорится о том, что наука не идет дальше символического изображения непосредственных опытных данных, что, например, оптика должна ограничиться лишь одним эмпирическим данным — функцией плотности энергии в пространстве и времени, Ланжевен отвергает такую точку зрения, как умаляющую богатство и сложность физических явлений.

Он отбрасывает также и апеллирующую к аристотелизму философию физики Дюгема. Приводя антинаучное утверждение Дюгема о том, что якобы нет надобности ставить вопрос о физическом, т. е. объективном значении выводов, дедуктивно получаемых из теории, и что физик якобы должен удовлетворяться тем, что при изучении сложных явлений он получает новые члены математических уравнений, являющиеся результатом будто бы произвольной деятельности ученого, — П. Ланжевен писал: «Не скрывается ли в этом прискорбная тенденция ограничить поле изысканий, объявить достаточным и окончательным общее и поверхностное познание вещей, запретить себе более глубокое изучение только потому, что первый успех дал нам в руки некоторые из наиболее общих законов? Знаем ли мы, что нам даст наше движение вперед, изучение под микроскопом живого организма? Какие мотивы боязни нами руководят? Зачем этот поворот назад, этот ignorabimus, против которого протестуют наши инстинкты и наши убеждения?» («Дух научного образования», стр. 50).

Далее П. Ланжевен совершенно справедливо указывал на то, что агностики противопоставляют человека природе, игнорируют его естественное происхождение. Он писал: «Мы рождены в ходе медленной эволюции, в непрерывном и глубоком контакте со вселенной, которая нас сформировала; из наших неясных инстинктов вытекает чувство тождественности и общности со всей природой. Наше знание является усилием, которое все более глубоко и более сознательно проникает в природу...» (стр. 50).

Такого же рода критику воззрений Оствальда развивал П. Ланжевен и в своей лекции «Образовательная роль истории науки».

П. Ланжевен признает не только объективность, но и неограниченную познаваемость мира. Он выступает против агностицизма, а по существу и всей идеалистической линии оствальдов, дюгемов и им подобных враждебных науке философствующих естествоиспытателей. Однако он не может развернуть философ-

скую критику воззрений Оствальда и Дюгема, не видит с полной отчетливостью того, что общим в воззрениях Дюгема и Оствальда является идеализм.

Лишь в позднейших выступлениях, как, например, в статье «Позитивистские и реалистические тенденции философии физики» и особенно в статье «Современная физика и детерминизм», Ланжевен говорит о двух лагерях — лагере материализма, представленном диалектическим материализмом, и лагере идеализма.

Философской беспомощностью объясняется, например, то, что Ланжевен, критикуя Оствальда и Дюгема, ссылается на Маха. Правда, при этом он приводит как раз те его положения, в которых, как отмечал Ленин, Мах отступает от своей основной идеалистической линии и где этот апостол махизма говорит на естественно-научном языке. Но факт остается фактом — П. Ланжевен не видит основной философской линии Маха, как он не увидел махистской философской линии у Эйнштейна, хотя и почувствовал антинаучный характер философских рассуждений другого теоретика современной буржуазной физики — Н. Бора.

Причина этой недостаточной прозорливости П. Ланжевена заключается в непонимании партийности философской борьбы, разъясненной марксизмом-ленинизмом, в наличии буржуазных влияний на мировоззрение П. Ланжевена. Он не видел непримиримой классовой борьбы в капиталистическом обществе, не видел и того, что отражением этой борьбы является борьба материализма с идеализмом в области философии, естествознания, науки и мировоззрения вообще.

Ланжевен не видел, что идеализм порождается тем же самым классом, который был заинтересован в фабрикации и раздувании «дела Дрейфуса» и который во второй мировой войне предал немецкому фашизму национальные интересы Франции.

* * *

В вопросах метода естествознания и особенно физики П. Ланжевен более подготовлен, чем в вопросах теории познания. Однако и здесь он выступает лишь стихийным материалистом, обнаруживая полное незнакомство с философией марксизма-ленинизма, если не говорить о его самых поздних выступлениях.

Тем более важно подчеркнуть то, что П. Ланжевен, будучи не знаком с диалектическим материализмом, все-таки рассматривает философские проблемы с точки зрения, приближающейся к позициям диалектического материализма. Ход развития физики

поставил перед П. Ланжевеном проблемы, которые можно было решать только антиметафизически, антимеханистически. Наука, как писал Ленин, «рожает диалектический материализм»; не случайно, что П. Ланжевен уже в ранних своих работах стихийно приближался к диалектическому материализму. И по этому пути шло все его дальнейшее развитие.

Основное положение, из которого исходит П. Ланжевен, — это положение о том, что наука не есть нечто законченное, завершенное, застывшее. Наоборот, характерной чертой науки является, согласно Ланжевену, ее непрестанное развитие, переход от одной ступени к другой, более высокой.

В докладе «Дух научного образования» П. Ланжевен говорил: «За исключением некоторых существенных устоев, некоторых общих принципов, к которым я вернусь ниже, все остальное находится в беспрестанном изменении...» (стр. 46). О том же он говорил и в лекции «Образовательная роль истории науки». Здесь он подчеркивал, что наука развивается столь быстро, что все попытки ее догматического изложения неизбежно оказываются несостоятельными.

Исходя из положения о непрестанном и бурном развитии естествознания, особенно со второй половины XIX в., Ланжевен выдвигал требование исторического изложения законов физики, механики, естествознания вообще.

«Кто ежедневно пользуется результатами научных исследований, — говорил он в докладе «Дух научного образования», — тот должен относиться к ним с тем осторожным и обдуманным доверием, которое в состоянии обеспечить критическое отношение к ним. Из истории науки он должен знать, где кончается сфера применения законов, чтобы не пытаться, как это слишком часто делается, давать этим законам незакономерное расширение и не потерять ориентировку, когда он увидит факты в очевидном противоречии с этими законами» (стр. 44).

Исторически преходящий характер научных положений послужил основной темой лекции «Образовательная роль истории науки». «Подход к преподаванию с позиций историзма, — говорил в этой лекции Ланжевен, — более динамическая концепция далеко еще не завершенного приспособления идей к экспериментальным фактам, развитие гибкости ума под влиянием непосредственного общения с трудами великих ученых прошлого могли бы способствовать преодолению многих сомнений и предубеждений при столкновении с новыми идеями» (стр. 314).

«Ничто так не способствует общему развитию и формированию детского сознания, — читаем мы в другом месте, — как знакомство с историей человеческих усилий в области науки отраженной в жизнеописаниях великих ученых прошлого и в

постепенной эволюции идей. Только таким путем мы можем подготовить им достойных преемников и внушить подрастающему поколению представление о непрерывном развитии и гуманитарной ценности науки» (стр. 311).

Доказывая быстрый рост и историческую смену воззрений в естествознании, Ланжевен подчеркивал, что естествознание — еще молодая отрасль человеческого знания, что оно, собственно, находится еще во младенчестве, хотя уже и на этой стадии развития обнаружило свою мощь в познании природы и свою роль в развитии гуманизма, в развитии человеческого общества. Поэтому со всем пылом ученого-общественника Ланжевен выступал против всех и всяческих попыток догматизировать науку, изобразить ее как некоего старца, утратившего все возможности дальнейшего роста. Особенно энергично боролся он против догматизации механики и навязывания ее в качестве всеобщей основы физики.

Борьба Ланжевена с догматизмом в преподавании науки была направлена против реакционного течения в системе народного образования во Франции. Характеризуя учебники и преподавание физики и химии, Ланжевен в докладе «Дух научного образования» говорил: «Преобладающей чертой учебников физики является (от начала до конца книги) перечисление фактов и законов без большой перспективы, как, например, в электричестве, где развертывается внушительный кортеж странных законов и новых величин с их основными единицами. Этот характер работ, повидимому, определяется стремлением к слишком большой, быть может, преждевременной строгости. Положение дела, как сказал А. Пуанкаре, ухудшается еще и тем, что изложение законов дается чаще всего в догматической форме, формулировка законов появляется неизвестно откуда, а физик в качестве подтверждения ссылается на опыт» (стр. 44).

Останавливаясь на подготовке техников в средних учебных заведениях, Ланжевен говорил: «...он (техник. — *А. М.*) выходит из школы нагруженный целой коллекцией законов и формул, о которых он будет знать, что они большей частью неправильны, но не будет знать, почему и в каком именно смысле. Специальное высшее учебное заведение внесет свою лепту еще и тем, что увеличит количество фактов, которые учащийся накопил в своей памяти, но едва может удержать, поскольку у него не имеется связи, которая бы объединяла их между собой, — фактов, которые нужны сегодня, но окажутся бесполезными завтра ввиду постоянных и резких изменений в современной промышленности» (стр. 45).

Тот же догматизм в преподавании и в учебниках французской школы критиковал Ланжевен и 22 года спустя в лекции «Образовательная роль истории науки». Он констатировал, что

научные факты преподносятся в школе догматически, что преподавание носит сухой, статический характер.

Для устранения догматизма, сухости и мертвечины в методике преподавания Ланжевен рекомендовал постоянно обращаться к истории науки, особенно к изучению трудов классиков. Классики, доказывал Ланжевен, не были такими догматиками, как их ученики и эпигоны, игнорирующие указания своих учителей на ограниченное значение их открытий, на возможность других гипотез и теорий, отображающих другие стороны действительности.

Изучая историю науки, указывал Ланжевен, мы поймем, что «в наших знаниях содержится много как живого, развивающегося, так и преходящего, а это, в свою очередь, может предостеречь нас от опасности догматизма, который, как все то, что уже закончено и мертво, заключает в себе что-то безнадежное» (стр. 317).

Итак, Ланжевен защищал представление о науке, как о чем-то живом, развивающемся, и в этом развитии справедливо видел залог успеха науки. Поэтому он и предлагал ввести в преподавание и учебники элемент историзма как соответствующий природе вещей и природе науки.

Подводя итог своим воззрениям на значение исторического подхода при изложении данных естествознания и применяя эти воззрения к анализу преподавания физики и химии во Франции. Ланжевен приходил к ряду выводов.

Первым из его выводов было положение о том, что не должно быть двух систем образования, одна из которых посвящена познанию сущности, духа науки, ее живой природы, а другая — догмам науки и их практическим приложениям. Техник, не понимающий непрестанно изменяющегося облика науки, не способен быть плодотворным в прикладной области. В то же время наука, оторванная от практики, превращается в нечто спекулятивное, умозрительное. Теория и эксперимент, исследовательская наука и ее приложения, дедукция и индукция — едины и разрывать их нельзя.

Другой вывод, к которому приходил Ланжевен, заключался в констатации неудовлетворительной постановки образования в средней школе Франции. Эта система обучения, указывал он, не позволяет учащимся ознакомиться ни с духом науки, ни со способами применения науки на практике. В целом состояние образования в средней школе Франции Ланжевен охарактеризовал как отсталое, не соответствующее состоянию науки и промышленности.

Весьма важно указание Ланжевена на причину такого положения. Отмечая, что изгнанные в конце XVIII в. после буржуазной революции во Франции из программ средних учебных

заведений экспериментальные науки, в 1852 г. были включены в школьные программы лишь в чисто утилитарном виде, он писал: «Создается впечатление, что правительства опасаются развития того духа критики, который сопутствует правильно понятому преподаванию научных дисциплин» (стр. 320).

Констатируя такое положение дел в области преподавания естествознания во Франции, Ланжевен выдвигал требование, чтобы воспитание учащегося являлось подготовкой к общественной деятельности.

* * *

Вопрос о догматизме и метафизичности Ланжевен особенно глубоко и конкретно ставил в отношении проблем физики и химии.

Общий итог, к которому приходил он, рассматривая состояние физики и химии в начале XX в., кратко формулируется им так: все в движении, все изменяется, нет ничего, что не было бы затронуто прогрессивным развитием науки, революцией, совершающейся в естествознании.

Ланжевен подробно останавливает внимание своих слушателей и читателей на двух общих принципах, которые остаются незыблемыми, — более того, лежат в основе прогрессирующей науки. Это — принцип развития и принцип эквивалентности.

Принцип развития материальных объектов, исследуемых физико-химическими науками, получает, по Ланжевену, свое выражение во втором законе термодинамики. Ланжевен, рассматривая этот принцип (он его называет принципом Карно), берет его в сущности не в узкой физической формулировке, а как общий закон развития. Он говорит, что этот принцип выражает историзм физико-химических процессов природы, неповторяемость этапов ее развития, известную асимметричность причин и следствий, направленность процессов природы в отличие от чисто механической повторяемости тех же самых соотношений определенных систем.

Принцип Карно, пишет Ланжевен, «позволяет утверждать, что из двух противоположных превращений, не сопровождающихся никакими внешними эффектами, возможно только одно: например, из двух явлений — взаимной диффузии двух газов в их постоянном общем объеме и спонтанного разделения этих газов — возможно только первое. Другими словами, достаточно сложная система не проходит два раза через одно и то же состояние; эволюция имеет место в определенном порядке, история не повторяется. Ничего другого в принципе Карно нет, и его обычное изложение представляет собой только частный случай общего закона» («Дух научного образования», стр. 48).

В позднейших своих выступлениях Ланжевен прямо указывал, что удар метафизике и механицизму был нанесен открытием эволюции и развитием самой нашей науки.

Насколько глубоко Ланжевен понимал развитие в области физических и химических процессов природы, видно из его трактовки другого принципа — принципа эквивалентности.

Развитие для Ланжевена — не только количественное изменение, но переходы от одной качественно отличной формы явлений к другой. Эти переходы имеют свою меру, свой эквивалент, определенное количественное соотношение между взаимнопревращающимися формами.

Рассматривая принцип эквивалентности, Ланжевен писал: «Этот принцип вытекает исключительно из мощной индукции, объединяющей часть векового опыта и завершающейся понятием цены, за которую покупается трансформация, понятием относительной стоимости изменений, которым подвергается материя. Можно утверждать, что если какая-либо трансформация, например падение какого-либо весомого тела, сопровождается, скажем, только таянием определенного количества льда, то окажется невозможным, — как бы мы за это ни брались и каковы бы ни были механизмы, использованные для этого, — соединить эту же трансформацию с таянием другого куска льда. Обратная трансформация должна сопровождаться затвердеванием такого же количества воды.

Таким образом, можно определить ту цену, которой покупается данная трансформация, измерить ее неизменную стоимость посредством общей меры, например посредством расстаявшего льда, и однозначно определить энергию, потерянную в ходе этой трансформации, как пропорциональную весу расплавленного льда. Из самого принципа эквивалентности вытекает, что это измерение независимо от частного явления, взятого в качестве общей меры. Энергия не является больше «чем-то, что остается постоянным»; относительное значение трансформации одновременно дает нам точное о ней понятие и ее меру» («Дух научного образования», стр. 47—48).

К сожалению, ставя и решая вопрос об эквивалентности качественно различных форм энергии, форм вещества и т. д., Ланжевен и не подозревал, что основоположники марксизма, создав теорию трудовой стоимости, дали тем самым метод решения рассматриваемых им вопросов.

Во всех случаях, когда сравнению подлежат качественно различные предметы или явления, это сравнение осуществляется через установление эталона, выражающего или представляющего собой то общее, что подлежит измерению в обоих сравниваемых, качественно различных предметах или явлениях. Так, платино-иридиевый эталон тяжести служит мерилом свойства

тяжести, присущего качественно различным телам. Работа, производимая при поднимании на поверхности земли одного килограмма массы на высоту одного метра, служит мерилом различных форм энергии. Кусок золота служит эталоном овеществленного человеческого труда и т. д. и т. п.

При различных превращениях вещества, энергии и т. д. ни вещество, ни энергия не остаются неизменными — они превращаются из одной качественно особой формы в другую. Неизменным остается лишь эквивалент, мера этого перехода.

Под неизменностью здесь нужно подразумевать то, что определенная причина порождает при тех же условиях определенные действия. Одно определенное количество вещества порождает вполне определенное количество другого. Не может быть творения из ничего или исчезновения в ничто. Нет и не может быть чудес.

Именно этот общий смысл закона эквивалентности, в общей форме сформулированного еще в XVIII в. великим русским ученым Ломоносовым, раскрывал Ланжевен в своем докладе в 1904 г. (см. «Дух научного образования»).

Отсюда, из этой общей формулировки закона, вытекали антиметафизические выводы Ланжевена в отношении обычной трактовки законов сохранения массы, вещества, энергии.

Обычно говорят о «сохранении» массы, вещества, энергии. Ланжевен справедливо и в полном согласии с идеями Энгельса подчеркивал, что закон эквивалентности истолковывается при этом неправильно, догматически. Дело не в сохранении, не в неизменности массы, вещества, энергии — все они изменяются, развиваются. Дело в том, что это превращение происходит закономерным путем, и мерой этого превращения служат соответствующие эквиваленты.

Раскрывая смысл закона эквивалентности и закона развития, Ланжевен подчеркивал, что они по своей природе не связаны с механикой и механистическим их истолкованием, что они стоят выше всякой механики. В докладе «Физика электронов» он указывал, что принцип эквивалентности независим от динамики. В то же время в докладе «Дух научного образования» Ланжевен отмечал, что оба рассматриваемых им закона или принципа обычно истолковываются механистически, что вредит науке вообще, пониманию рассматриваемых законов в особенности. «Ввиду исключительной общности этих принципов, — писал он, — вполне понятна гибкость и плодотворность их применений; но особенно яркими становятся они тогда, когда их освобождают от механических пеленок, в которых они, возможно, выросли и в которых слишком часто представляют их нам еще и сейчас» (стр. 49).

* * *

Механистическое истолкование законов эквивалентности и законов развития Ланжевен критиковал с двух сторон. Во-первых, он подвергал критике обычное понимание предмета и метода механики, доказывая при этом, что предмет и метод физики и химии отличаются от предмета и метода механики, что в физике и химии они гораздо шире, чем в механике.

С другой стороны, он подвергал критике тот порочный метод «мистификации» (мы бы сказали — метафизический метод), благодаря которому раздуваются односторонние частные положения естествознания, которые возводятся в ранг всеобщих принципов, якобы господствующих над всей природой.

Остановимся сначала на второй, более общей проблеме.

В лекции «Образовательная роль истории науки» Ланжевен говорил: «На каждом этапе развития человечества мы встречаемся с одной и той же тенденцией к преувеличению значения уже полученных результатов и с верой в то, что эти результаты являются «ключом к познанию всех тайн вселенной» (стр. 315). В качестве таких «преувеличений» Ланжевен приводит магию, астрологию, возведение в абсолют дедуктивного метода мышления, схоластику, механицизм, энергетизм.

Действительно, раздувание отдельных сторон познания служит почвой для идеализма и метафизики. Закрепляемые интересом господствующих, эксплоататорских классов, эти воззрения, возведенные в абсолют, являются орудием угнетения и одурачнвания трудящихся.

Ланжевен верно почувствовал это, но не смог понять классовой природы этого обстоятельства. Тем не менее направление критики Ланжевена правильно. Его критика бьет по догматизму, метафизике, идеализму.

Такое преувеличение, возведение в абсолют, такое мистифицирование Ланжевен критиковал, прежде всего, в лице механицизма. Эта критика у него наиболее развернута и наиболее глубока.

Ланжевен отвергает стремление, существующее и в наши дни, сделать механику основой физики и химии, а последние превратить в ветви механической науки.

Механика рассматривает явления природы лишь поверхностно. Движение она рассматривает, доказывал Ланжевен, молярно, как простое перемещение масс, не входя в сущность тех или иных структур материи. Поэтому механика отображает лишь ограниченное число свойств материи, обобщает лишь некоторое число эмпирических данных, игнорируя другие.

Приложимость механики к атомистике — особой отрасли естествознания — и успехи этого приложения обусловлены тем,

что в явлениях атомизма механика берет самое простое, именно тот случай, когда частицы рассматриваются в кинетической теории газов независимыми. «Однако, — добавлял Ланжевен, — до сих пор это единственная область, общая и для механики и для атомистики; одна кончается там, где начинается другая» («Дух научного образования», стр. 53).

Свои истоки атомистика получает не в механике, а в химии и в учении об электричестве. Закон кратных отношений, законы электролиза, ионизация газов, катодные лучи, заряд электрона и т. д. — вот основные факты, из которых выросла и развилась атомистика.

Поэтому атомистика не может быть сведена к механике, хотя такие претензии выдвигаются; эти претензии принесли не только успехи в кинетической теории газов, но и немалый вред, затормозив развитие атомистики, послужив основанием для несправедливых нападок на нее.

У атомистики есть своя, более широкая, чем у механики, основа. В то время как механика ограничивается лишь поверхностной стороной явлений, атомистика раскрывает внутреннюю структуру материальных образований и процессов. «В химии так же, как и в физике: когда речь идет о внутренних изменениях вещества или о явлениях, которые, подобно свету, раскрывают ее глубокую структуру, механика, — пишет Ланжевен, — становится недостаточной, и в силу вступают атомистические идеи» (стр. 53—54).

Атомистика, — там же подчеркивал Ланжевен, — вся в развитии, в движении; она растет, обогащается все новыми и новыми положениями. Механику же ее адепты превратили в анатомический препарат, в мумию, в нечто мертвое, в систему догм, неподвижных и якобы не развивающихся, не обогащающихся новым эмпирическим материалом, новыми принципами.

И это в то время, когда принципы механики и ее истоки окружены темнотой, когда история развития механики оказывается засоренной различными теологическими и телеологическими измышлениями. Так, Ланжевен отмечает, что Декарт, «обосновывая» закон сохранения количества движения, апеллировал к божественному совершенству, а Мопертюи «выводил» принцип наименьшего действия из простоты деяний мнимого творца вселенной.

Рациональный смысл принципов механики не раскрыт. В силу догматизма и одностороннего дедуктивного изложения механика преподносится для непосвященных как нечто априорное, как чистое творение духа, возникшее сразу и в окончательной форме.

В действительности же, доказывал Ланжевен, механика имеет эмпирическое происхождение, как и другие науки. Ее

обобщения опираются на индукцию так же, как на нее опираются физика и химия.

Ланжевен решительно отвергал претензии на то, чтобы механика была основой преподавания физики и химии. Он подвергал критике высказывание французского физика А. Корию, настаивавшего на том, что рациональная механика должна быть базисом политехнического образования, а все прочие науки должны лишь облегчать, иллюстрировать, дополнять курс рациональной механики.

Благоволение к механике, подчеркивал Ланжевен, соединялось в конкретных условиях Франции (и не только Франции!) с пренебрежительным отношением, с замалчиванием, изгнанием из школьных программ атомистики.

Атомистика — самая плодотворная и прогрессирующая ветвь естествознания — отвергалась как нечто якобы еще необоснованное, несформировавшееся, недостойное войти в программы школ. Тем самым оказывалась услуга тому философскому течению среди естествоиспытателей, которое вообще отвергало атомизм, — именно махизму.

Механика, доказывал Ланжевен, не должна быть центром преподавания. Возражая против необоснованных претензий превратить механику в основу физики и химии и распространить ее на области знания, по своей природе выходящие за пределы механических явлений, Ланжевен особое внимание уделял соотношению механики и электродинамики. Именно при разборе этого соотношения вскрывал он мнимую незыблемость и кажущуюся самоочевидность принципов механики, прежде всего принципа инерции.

Важнейшим фактом развития физического знания явилось открытие инерции электромагнитного происхождения. Тело, заряженное электричеством, при приведении его в движение обнаруживает наличие дополнительной инерции, обусловленной наличием электрического заряда.

Отсюда вытекает необходимость допустить возникновение массы электромагнитного происхождения. Уже этот факт, вместе с наличием данных гидродинамики, также подводящих к возможности объяснения возникновения инертности из наличия вихревых форм движения, поставил перед учеными вопрос о том, что инертность и масса — явление, повидимому, не первичное, а производное.

Когда же был открыт электрон и была доказана изменчивость его массы в зависимости от скорости его движения, когда выяснилась возможность трактовать массу электрона как массу электромагнитного происхождения, то стало невозможным рассматривать механическую инертность и массу как неизменное, первичное свойство вещества. Наоборот, как доказывал Ланже-

вен, инертность и массу следует рассматривать как нечто производное, возникающее на основе более простых явлений природы. Такими более простыми явлениями, по его мнению, оказываются явления электромагнетизма — явления, наблюдаемые в электромагнитном поле или, как выражались в начале XX в., в электромагнитном эфире.

Раньше электродинамику пытались свести к механике. Теперь, подчеркивал Ланжевен, более оправдана противоположная тенденция, «которая в настоящее время кажется более плодотворной, а именно: рассматривать механику как следствие и поставить в первый ряд электромагнетизм, связанный с атомистикой» («Дух научного образования», стр. 52).

Электромагнитные явления Ланжевен рассматривал как доили предмеханические.

Из этих воззрений у Ланжевена вытекало предположение, что инерция, масса, сила и т. п. — отнюдь не самоочевидные, вечные свойства материи, а такие, которые возникают из других, более простых ее свойств.

Механические явления более обыденны и доступны нашему повседневному опыту, но они совсем не просты. Обыденное — это еще не самое простое. Механические явления в действительности требуют своего объяснения на основе более простых явлений.

Так Ланжевен критиковал односторонность механистических воззрений на природу. Он призывал к усвоению того нового, что внесла электродинамика; он говорил, что нужно научиться мыслить в понятиях электромагнетизма.

* * *

Как видим, Ланжевен был не только антидогматик, антиметафизик, антимеханист. Он много сделал для расчистки почвы, обеспечивающей усвоение физиками диалектического материализма.

П. Ланжевен дал глубокий анализ ряда философских проблем современной физики и внес значительный вклад в борьбу с антинаучными, идеалистическими извращениями современных открытий.

Ланжевен был выдающийся физик. Его работы относятся к важнейшим областям физики. Начав с участия в работах Ж. Перрена по вопросам ионизации газов при воздействии на них рентгеновских лучей и развив далее это направление в самостоятельных работах, в том числе и в своей докторской диссертации, П. Ланжевен приобрел мировую известность своими работами по теории магнетизма.

Продолжив исследования П. Кюри, Ланжевен дал объяснение явлений магнетизма на основе электронных представлений. Он доказал универсальность явления диамагнетизма, включая

и ферромагнитные тела. Он создал теорию зависимости диамагнетизма от температуры, дал термодинамическое доказательство обнаруженной П. Кюри и известной как второй закон Кюри обратной зависимости магнитной восприимчивости от абсолютной температуры. Ланжевен создал та же статистическую теорию парамагнетизма. Эти исследования сохранили свое значение и до настоящего времени. Они оплодотворили работы ряда других физиков (М. Борна, П. Дебая, В. Гейзенберга и др.).

Огромнейшее значение имеют также работы Ланжевена по изучению и применению пьезокварца для получения ультракоротких упругих волн, впервые исследованных в лаборатории знаменитого русского физика П. Н. Лебедева. Заставляя пластинку кварца колебаться под влиянием переменного электрического поля высокой частоты, Ланжевен получил ультразвуковые волны. Эти его работы получили (прежде всего, в его собственных руках) практическое применение для ультраакустической локации, подводной сигнализации, для обнаружения подводных лодок и пр.

Ланжевену принадлежит также огромная заслуга в разработке коренных проблем современной физики, связанных с теорией относительности и теорией квантов. Сам Эйнштейн в своей статье, посвященной памяти Ланжевена, признает самостоятельность пути, по которому шел Ланжевен и который привел последнего к формулировке некоторых основных положений теорий относительности.

Являясь крупнейшим физиком современности, Ланжевен на протяжении почти полустолетия выступал как крупнейший мыслитель, подвергавший глубокому анализу философские проблемы современной физики. Можно без преувеличения сказать, что он принадлежит к числу тех, сравнительно немногих, физиков капиталистических стран, которые спасали и спасают честь науки, давая открыто и сознательно отпор натиску идеализма и метафизики на новейшие открытия физики.

* * *

Ланжевен подвергает анализу общее положение в области физики и естествознания к началу XX в. Еще в 1904 г. он писал, что новые открытия разрушили рамки старой физики. Эта идея повторяется у него и в позднейших работах. Поток новых открытий вышел далеко из русла, по которому текла жизнь физики XIX столетия. Он подчеркивал, что физики пытались объяснить новые явления на основе уже известных. Но это не удалось, и создалось своеобразное отставание теории от эксперимента. Физики перестали поспевать с теоретическим перевариванием новейшего экспериментального материала. Стала отставать работа по разработке системы понятий физики, ее языка. Этим

воспользовались склонные к идеализму физики и философы-идеалисты для проповеди агностицизма, пессимизма.

Большое внимание уделял Ланжевен позитивизму, в особенности махизму. Именно это философское течение имел он, главным образом, в виду, когда в статье «Современная физика и детерминизм» писал: «Те, кто старается изобразить эволюцию нашего познания детерминизма как банкротство причинности, напрасно ссылаются на новейшие достижения современной науки. Их идеи взяты совсем не оттуда; они извлечены из старой философии, враждебной научному познанию; ее-то они и хотят снова протащить в науку. И когда тот или иной философ-идеалист ссылается на физика-идеалиста, он лишь берет у него обратно те представления, которые когда-то ссудил ему сам» (стр. 398).

Таким образом, крушение старых понятий и революционная ломка новейшими открытиями рамок старой физики — вот одна из причин идеалистических выводов, которые делаются некоторыми физиками и философами-идеалистами.

Другой причиной кризиса физики является, по Ланжевену, ее математизация.

Отставание работы по материалистическому осмысливанию бурно развивающегося математического аппарата в физике льет воду на мельницу махизма, идеализма вообще. Получается, что физики занимаются математическим описанием явлений, игнорируя их внутреннюю сущность. Они не раскрывают физического, объективного содержания математических теорий и отдельных математических уравнений. Создается положение, при котором в математическом формализме содержится, как писал об этом Ланжевен, больше, чем в суждениях физиков о соответствующих явлениях.

В статье «Зерна электричества и электромагнитная динамика» Ланжевен начало такой формальной математизации физики относит к временам Максвелла. Раньше электрические явления объясняли как результат действия электрических флюидов (невесомых жидкостей). Затем это представление было отброшено. Максвелл, обработав идеи Фарадея математически, не дал физического истолкования сущности электрических явлений, а ограничился лишь уравнениями, сыгравшими, правда, огромную роль, но преподнесенными формально. «Физики второй половины XIX в., — писал Ланжевен, — оставили этот вопрос без внимания вследствие появления общих тенденций энергетического периода, возникших после того, как выяснилась полная несостоятельность теории тепловых и световых жидкостей» (стр. 157).

Естественно, что эта линия была неправильной, так как развитие физики доказало материальность электричества в форме

электронов, в форме своего рода атомистики, против которой боролся махизм. В дальнейшем атомизм электричества был признан, но произошло это вопреки философской тенденции буржуазных физиков.

Из приведенного видно, что Ланжевен, поскольку речь шла о причинах, порожденных кризисом физики, в общем правильно вскрыл черты тех общих трудностей, которые переживала и переживает физика XX столетия. И это еще и еще раз убеждает нас в глубине и прозорливости ленинского анализа кризиса физики. Именно Ленин еще в начале XX столетия показал, что ломка понятий, истолковываемая в духе философского релятивизма, и математизация физики, истолковываемая как «исчезновение материи», явились истоками идеалистических извращений новейших открытий физики.

В позднейших своих работах Ланжевен под влиянием распространяющихся все шире и шире идей Ленина усвоил и самый термин «кризис физики». Эту терминологию он применяет в статьях «Позитивистские и реалистические тенденции философии физики» (1938) и «Современная физика и детерминизм» (1939).

Таковы самые общие взгляды Ланжевена на положение в физике XX столетия.

Перейдем к рассмотрению его анализа отдельных проблем — пространства, времени, материи, причинности.

Новейшее развитие физики показало, прежде всего, недостаточность прежнего понимания пространства и времени, господствовавшего в механике и физике.

Как известно, Ньютон рассматривал пространство и время как некие сущности, лежащие вне материи и независимые от нее. Для него пространство и время не являлись формами существования материи. Они извечны, абсолютны в смысле неизменности. В них, как в извечно данных вместилищах материи, происходит движение тел.

Анализируя представления Ньютона о пространстве и времени, Ланжевен подчеркивал ту сторону этих представлений, которая определяет их связь с представлением о моментальном дальнодействии, о мгновенном распространении действия в бесконечном пространстве.

Ньютоновы выражения силы, массы, закона всемирного тяготения и построенный по их типу закон Кулона предполагают, что действия силы, в том числе тяготения, распространяются мгновенно.

Таким образом, признание объективности существования пространства и времени в системе воззрений ньютоновской механики и дофарадеевских учений об электричестве сочетается с их противопоставлением всему материальному, с отрывом от этого материального.

Материальные тела движутся с определенными конечными скоростями. Взаимодействие же этих тел совершается, по Ньютону, мгновенно. И поскольку это взаимодействие совершается в пространстве и времени, последние должны рассматриваться как нечто прямо противоположное материи, как абсолютная пустота. Фарадей же, как отмечал Ланжевен, обратил внимание на среду, окружающую электрические заряды. Он развил представления, согласно которым пустого пространства нет. В процессе развития фарадеевских воззрений было доказано, что взаимодействие электрических зарядов происходит не моментально, но с определенной скоростью, именно со скоростью света, равной 300 000 *км/сек.*

Вместо пустого пространства и пустого времени Ньютона и вместо моментального дальнодействия физика встала пред фактом заполненности пространства эфиром или электромагнитными полями и фактом конечной скорости взаимодействия.

Анализируя эту проблему, Ланжевен подчеркивал, что новому пониманию конечной скорости взаимодействия и отсутствия пустого пространства соответствует и новое, в корне отличное от ньютоновского, понимание пространства и времени.

Наоборот, доказательство конечной скорости взаимодействия, — а это есть единственно материалистическое решение проблемы, — влечет за собой как неизбежное следствие отрицание понятия пустого пространства и времени.

Ланжевен подчеркивал, что понятие пространства и времени ньютоновской механики несовместимо с электродинамикой. Более того, Ланжевен утверждал, что понятие пространства и времени, имея эмпирическое происхождение, меняется с каждым этапом наших познаний, с каждой стадией в развитии наших теорий о физическом мире.

Главнейший философский результат возникновения теории относительности — это изменение представления о пространстве и времени. Вместо так называемых «абсолютных» пространства и времени Ньютона возникли «оптические», т. е. основанные на рассмотрении электромагнитных процессов, представления о пространстве и времени. Изменилось понимание физиками одновременности событий.

Доказательство конечной скорости взаимодействия электрических зарядов и масс, доказательство заполненности пространства материей повело, по Ланжевену, к изменению воззрений на массу, энергию и на законы их сохранения.

Фарадей и Максвелл доказали, что энергия, возникающая благодаря сосредоточению заряда на определенном теле или благодаря движению заряда, распределена в пространстве, окружающем заряды. В то же время было доказано, что электричество обладает инертностью особого рода. Это сделало

необходимым, по Ланжевену, признание «инертности энергии». Энергия и масса оказались тесно связанными друг с другом.

Коренное отличие ньютоновской механики от электродинамики Ланжевен видел в различии групп преобразований при переходе от одних систем координат к другим в обеих этих дисциплинах. В ньютоновской механике имеет место группа галилеевых преобразований, а в электродинамике — группа лоренцевских преобразований. Применяя эти преобразования, мы сохраняем неизменной форму математического выражения тех или иных явлений. В результате в механике и электродинамике различными оказываются представления о том, что является независимым от выбора систем координат в том и другом случае. Отсюда, по Ланжевену, и различие в понимании реальности в ньютоновской механике и электродинамике. В последней, на основе теории относительности, реальностью является «мир Минковского», а инвариантом — отрезок «мировой линии» в мире Минковского.

Рассматривая вопрос об изменении воззрений на пространство в физике, Ланжевен в 1932 г. в статье «Относительность» подчеркивал, что по существу основателем современной теории относительности нужно считать Лобачевского и других создателей неэвклидовых геометрий; при этом Лобачевского он называет первым в ряду других.

Таковы важнейшие проблемы, которые ставит и рассматривает Ланжевен в своих статьях по вопросу о пространстве, времени, материи в связи с теорией относительности. Прямота, ясность и в то же время необычная для современных буржуазных физиков глубина характеризуют выступления Ланжевена по этим вопросам. Тем более приходится сожалеть, что он при разборе упомянутых выше проблем не опирается на достижения диалектического материализма в анализе проблем пространства, времени, материи.

Ланжевен не один раз с иронией указывает на истолкование философами времени, пространства, материи. Но он при этом имеет в виду, конечно, только буржуазных философов-идеалистов. Именно к ним относятся его слова (см. статью «Время, пространство и причинность в современной физике») относительно понятия времени: «Для большинства философов это понятие смешивается с понятием последовательности состояний сознания одного и того же индивидуума, событий, которые следуют друг за другом в одной и той же части материи; физики же должны рассматривать события, происходящие в различных местах, а также специально уточнять понятие одновременности» (стр. 129—130).

Подобные же воззрения некоторых философов приводит Ланжевен и по вопросу о материи.

Однако он не приводит положения диалектического материализма о том, что пространство и время — коренные формы существования материи. Он не приводит определения материи как философской категории, даваемые Лениным и Сталиным. Эти определения были ему, очевидно, неизвестны, когда он писал приведенные выше строки.

Определения пространства, времени и материи, даваемые диалектическим материализмом, не только не тождественны с ньютоновскими определениями этих категорий, но неизмеримо шире и глубже того представления, которое сложилось на основе теории относительности.

Теория относительности отбросила метафизику ньютоновских воззрений на пространство и время; она привела в связь понятия материи, пространства и времени и подтолкнула физиков к рассмотрению пространства и времени в качестве форм существования материи. Однако, в то время как диалектико-материалистическое определение пространства и времени распространяется на все проявления материи, включая живые организмы и формы общественной жизни человека, и основывается на историческом воззрении на природу, общество и мышление, воззрение на пространство и время теории относительности распространяется лишь на область физических явлений.

Ланжевен, так метко разоблачавший незакономерные претензии механики на другие области физики — на атомистику и электродинамику, а тем более на все естествознание, не сумел провести этой линии в отношении новой динамики теории относительности. Представляя собой большой шаг вперед в развитии механики и физики, релятивистская динамика является ограниченным, односторонним отображением явлений действительности. Поэтому нельзя распространять ее воззрения на всю природу, на всю действительность, как это делают многие буржуазные ученые. Однако Ланжевен поддался влиянию этих ученых. Метафизически превращая математические выводы из теории относительности в некие новые абсолюты, наподобие ньютоновских, он пытался распространять эти выводы за пределы их приложимости.

Указанные нами промахи Ланжевена являются лишь проявлением его непоследовательности в проведении основной своей линии и не представляют коренного порока; что это действительно так, показывает его меткая критика извращений понимания причинности в квантовой теории Гейзенбергом, Бором и др.

Ланжевен высоко ценил и глубоко понимал значение теории квант. Он считал эту теорию дальнейшим развитием атомистических представлений.

В докладе «Физика прерывности» Ланжевен подчеркивал, что все явления физики — тепловые, электрические, включая

излучение, строение вещества и пр., — должны рассматриваться, исходя из понятия прерывности. Прерывность господствует во всех областях физики.

Доказательство наличия прерывности во всех физических явлениях, особенно в процессах излучения, привело к существенному изменению прежних воззрений.

Раньше, отмечал Ланжевен, явления рассматривали под углом зрения непрерывности и методом познания этой их стороны было дифференциальное и интегральное исчисление. При этом отдельные индивидуальные, дискретные, элементарные процессы или частицы вещества рассматривались как исчезающе малые.

Теперь физика принимает во внимание конечную величину этих индивидуальных элементов различных физических явлений. Для теоретического изучения этой стороны явлений потребовалось широкое применение статистических методов, опирающихся на теорию вероятностей.

Раньше ограничивались суммарным эффектом действия бесконечно большого числа отдельных элементарных процессов или частиц, не входя в изучение свойств этих элементов. Теперь физика пошла вглубь. Она по общему эффекту, по существу конечного, а не бесконечно большого числа элементов, стремится познать свойства этих элементов, составляющих целое. При этом, отмечал Ланжевен, по-новому встают философские вопросы о соотношении частей и целого, внешнего и внутреннего, индивидуального и общего. Ланжевен обращал внимание физиков и философов на важность анализа содержания самого понятия вероятности.

Ставя эти вопросы, Ланжевен указывал, что физики и математики сначала постулируют определенное свойство элементов статистического коллектива, а затем проверяют правильность отображения этими постулатами реальной действительности по соответствию математических выводов, полученных из той или иной теории явлений, результатам экспериментов.

Ланжевен рассматривал различные экспериментальные данные, относящиеся к вопросу о независимости отдельных событий статистического коллектива. Под этим углом зрения он рассматривал, например, экспериментальные данные о радиоактивности. По имевшимся тогда данным, следовало, что распад радиоактивных атомов не зависит от предшествующей истории радиоактивного вещества, от наличия атомов, соседних с распадающимся атомом, и т. д

В то же время Ланжевен допускал возможность критического отношения к теоретическим положениям, лежащим в основе предположения о взаимной независимости распада соседних атомов радиоактивного вещества.

Позднее, после выступления Ланжевена с докладом «Физика прерывности», действительно обнаружилось, что прежние экспериментальные данные были не полны. Открытие цепных реакций радиоактивного распада атомов с участием нейтронов доказало наличие взаимозависимости распада радиоактивных атомов, когда они взяты в определенной комбинации и в массе, составляющей то, что получило название «атомного котла».

Ланжевен не удовлетворялся ходячими, поверхностными воззрениями. Он стремился глубоко теоретически, философски проанализировать смысл процесса революции в физике и его отдельные этапы.

Он, например, прозорливо указывал на фундаментальное значение планковского кванта действия h для всей физики.

Очень важными и интересными в философском отношении являются соображения Ланжевена о причинах и источниках антинаучных, ложных выводов буржуазных физиков и философов идеалистического направления, выводов, которые делаются ими в связи с квантовой теорией.

Переход от обычных тел окружающего нас макромира к атомам и электронам означал, по Ланжевену, переход в новую, качественно отличную от ранее известных, область. Законы движения обычных тел теряют свое значение при переходе к микромиру.

Рассматривая эту проблему (в 1933 г.) в своем докладе «Атомы и корпускулы», Ланжевен писал: «Мы убеждаемся, что представления и понятия, которыми мы пользовались в макроскопическом мире, созданные для этого мира и использованные с успехом в течение столь многих поколений, будучи перенесены в область микроскопических величин, оказываются непригодными. Такая постановка вопроса кажется мне несравненно более интересной. Таким образом, перед нами открывается мир гораздо богаче того, который представлял себе Паскаль, предполагавший одинаковое строение бесконечно малого и бесконечно большого, различающихся между собой только в масштабе» (стр. 361).

Ланжевен утверждал также, что переход от атомов и электронов к излучению, к волнам и квантам света также приводит нас к другой, качественно отличной от атомов и электронов области, так сказать, к третьей, если считать от обычных тел макромира, ступени углубления нашего познания в строении материи.

В то время как атомы, молекулы, электроны обладают электрическим зарядом и могут двигаться с различными скоростями, излучение не имеет заряда и движется с одной определенной скоростью, именно со скоростью света.

«Разница между материей (в смысле обычного вещества. — *А. М.*) и излучением, — писал Ланжевен, — остается фундаментальной; ее следует искать в понятии структуры, в присутствии или отсутствии в материи наэлектризованных центров, могущих двигаться с изменяемой скоростью по отношению к среде, в то время как излучение распространяется в этой среде с вполне определенной скоростью» («Инерция энергии и ее следствия», стр. 253).

Вскрывая качественное своеобразие новых областей знания, открытых физикой, Ланжевен видел источник неправильных философских выводов, делаемых из новейших открытий, в том, что к этим новым областям применяют понятия частицы, точки, индивидуума, причинности и пр., сформулированные применительно к явлениям движения обычных тел, к задачам, решаемым механикой Ньютона.

Ланжевен доказывал, что понятие материальной точки, плодотворное в обычной механике, неприменимо к области микромира. В последней нет объектов, обладающих обособленными индивидуальными свойствами, абстракцией которых является представление о математической точке в механике.

Обычная механика имеет дело с очень сложными телами. Отвлекаясь от всех прочих свойств и от размеров тела, за исключением массы, механика создала понятие материальной точки, обладающей массой. Оперируя этим понятием и законами обычной механики, ученые успешно решили множество проблем, относящихся к движению обычных тел.

Но применимо ли это понятие материальной точки к области микромира, если мы там имеем дело с качественно отличными от обычных тел объектами? Ланжевен отвечал на этот вопрос отрицательно.

Он доказывал, что индивидуально обособленное тело есть результат развития материи и возникает лишь на определенной стадии развития. До этой же стадии развития материи мы имеем дело с объектами, еще не оформившимися в качестве индивидуально обособленных тел.

Рассматривая этот вопрос в работе «Атомы и корпускулы», Ланжевен писал: «Невозможно составить себе представления о внутриатомном мире путем простой экстраполяции наших макроскопических представлений о движении» (стр. 360).

Об индивидуально обособленных телах Ланжевен писал: «Я глубоко убежден, что в физике, как и в биологии, индивидуальность является следствием сложности структуры и что появление отдельного индивидуума возможно лишь на определенном структурном уровне» (стр. 362). Исходя из этих воззрений, Ланжевен и ставил вопрос о том, можно ли вообще говорить, что в природе есть такая вещь, как «движущаяся элементарная

частица». Не отрицая наличия элементарных частиц, он указывал, что частица в микромире есть скорее не отдельный, обособленный предмет, а состояние некой материальной среды.

«Частица (название, которое, впрочем, следовало бы изменить) перестает быть, — писал он в той же работе, — отдельным предметом и превращается в степень возбуждения приписываемого ей состояния, причем, естественно, для определения комплекса существенным является только число степеней возбуждения, приписываемых каждому из возможных состояний» (стр. 364).

Подтверждение своим воззрениям на элементарные частицы Ланжевен видел в появлении новых статистик Бозе—Эйнштейна и Паули—Ферми, отличных от прежних статистик, исходивших из представления об отдельных, индивидуально обособленных частицах. Старые статистики оказались непригодными для объяснения многих явлений, например излучения абсолютно черного тела и т. д.

Считая необоснованным и неправильным применение понятий, созданных для отображения явлений макромира, к микромиру, Ланжевен в этой экстраполяции понятий макромира на микромир видел один из источников неправильных суждений физиков и философов по вопросам причинности, познаваемости явлений микромира.

Как известно, так называемый принцип неопределенности Гейзенберга явился для Гейзенберга, Бора и др. поводом для утверждения, что явления микромира не детерминированы так, как детерминированы явления макромира, что электронам якобы присуща «свобода воли».

Ланжевен доказал, что люди, высказывающие такого рода антинаучные положения, ошибаются, прежде всего, в самой постановке вопроса. Из факта неприменимости понятия причинности, выработанного в применении к задачам ньютоновской механики, к микромиру делается ложный вывод о том, будто явления микромира причинно не обусловлены. При правильной же постановке этого вопроса нужно было бы сделать вывод о том, что объекты микромира отличны от объектов макромира, и для познания их закономерности, причинности нужно вскрыть своеобразие этих объектов и создать понятия, отображающие своеобразие их природы.

То, что вместо научной постановки вопроса некоторые буржуазные физики охотно идут на отрицание причинности, Ланжевен называл «интеллектуальным развратом».

«Во имя этого (принципа неопределенности. — *А. М.*), — писал Ланжевен, — стали предаваться самым разнообразным видам интеллектуального разврата, провозглашая «свободу воли» частиц, свободный выбор природы и т. д.» (стр. 359).

В качестве примера «интелллектуального разврата» Ланжевен в том же докладе цитирует соответствующие высказывания Дирака, Эддингтона и др.

Разоблачая и отбрасывая проявления интеллектуального разврата, столь распространенные в современном капиталистическом обществе, Ланжевен доказывал, что признание причинности и закономерности явлений природы — основа науки, ибо нет науки без познания объективной, закономерной обусловленности, детерминированности этих явлений. Отрицание причинности ведет к отказу от науки. Он доказывал, что успехи науки подтверждают силу человеческого разума, способность человека все дальше и глубже познавать природу. Он указывал на силу этого человеческого разума и решительно отбрасывал агностические высказывания Гейзенберга, Бора и других буржуазных физиков.

Эти физики говорили, что постоянная Планка h есть предел человеческого познания, дальше которого мы не сможем пойти. Ланжевен отвергал эти и другие пессимистические и агностические высказывания. Он указывал, что в начале XX в. физики, клонившие к идеализму, утверждали, будто атомы непознаваемы. Эти физики, как известно, провалились со своими утверждениями. Теперь говорят о непознаваемости планковской постоянной h и т. д.

Утверждая, что планковская постоянная h не есть предел человеческого познания, Ланжевен призывал ученых к смелой разработке системы понятий и научного мировоззрения в целом.

При этом он особенно подчеркивал необходимость перехода от созерцательного, механистического материализма к материализму творческому, революционному — диалектическому. На примере механистического понятия причинности он показывал, что механистический материализм ведет к фатализму, не раскрывает активной роли человека, роли практики в познании мира, активной роли познавательного процесса. Подлинно же научное мировоззрение, доказывал Ланжевен, отрицает фатализм, признает единство теории и практики, воодушевляет человека на дальнейшие успехи в познании и овладении природой.

Ланжевен призывал не бояться трудностей, не смущаться наличием противоречивых понятий и гипотез в науке. На примере развития физики за последние 50 лет он доказывал, что единство противоположностей (корпускула — волна и т. п.) лежит в основе всех физических явлений.

В докладе «Механистический и диалектический материализм», сделанном за год до смерти, Ланжевен говорил: «Я думаю, что только философия диалектического материализма может послужить нам путеводной нитью в предстоящих долгих и

напряженных трудах, связывая нас с широким путем человеческого прогресса».

Ознакомившись с основными положениями диалектического материализма, Ланжевен понял, что именно диалектический материализм дает ответы на те вопросы, при решении которых буржуазные физики скатываются в идеализм. Он говорил: «Я вполне уяснил себе историю физики, только ознакомившись с основными принципами диалектического материализма».

* * *

Борьба Ланжевена за материализм, борьба против извращения науки философскими идеалистами и их подголосками из среды физиков, глубочайший анализ теоретических проблем современной физики — все это является очень ценным вкладом в общую борьбу передовых сил современного общества за передовое мировоззрение, развивающееся под знаменем Маркса — Энгельса — Ленина — Сталина.

Своим примером защиты науки против различных впадающих в идеализм джинсов, эддингтонов, комптонов и прочих извратителей и линчевателей истины Ланжевен поддерживал мужество тех ученых, которые остаются верны науке и научному мировоззрению. Сам он — в процессе борьбы — от стихийно-диалектического материализма поднялся до сознательного присоединения к сторонникам диалектического материализма, все более и более выковывая свои философские воззрения в одну монолитную систему. Тем самым Ланжевен на личном примере показал, что от стихийно-диалектических воззрений представителей естественно-исторического материализма, как доказал Ленин в «Материализме и эмпириокритицизме», есть лишь один путь, если придерживаться научного мировоззрения, — это путь к сознательному усвоению диалектического материализма.

В выступлениях Ланжевена последнего периода его жизни, — когда он, открыто встав на сторону мировоззрения Маркса — Энгельса — Ленина — Сталина, неоднократно пытался популяризировать положения диалектического материализма, — встречаются, однако, промахи и ошибочные формулировки. Так, в докладе «Механистический и диалектический материализм», определяя отношение диалектического материализма к предшествующему развитию философии, он говорил: «Это учение, продолжающее великую линию прогресса человеческой мысли в области философии, в свою очередь является результатом синтеза между механистическим материализмом наших французских философов XVIII в. и идеалистической диалектикой Гегеля, синтеза, основы которого были заложены сто лет назад Карлом Марксом и Фридрихом Энгельсом».

Ланжевен был прав в том, что диалектический материализм не вырос на пустом месте, но возник на основе положительных достижений в развитии предшествующей истории философии. Но он неправильно трактует диалектический материализм как синтез механистического материализма и идеалистической диалектики Гегеля, не видя коренной разницы между всей предшествующей историей развития философии и периодом развития ее после возникновения марксизма-ленинизма.

Так, в своих выступлениях Ланжевен неоднократно объявлял диалектику современного развития физики иллюстрацией гегелевской диалектики, не раскрывая того, что гегелевская диалектика была идеалистической, т. е. враждебной науке, а в области естествознания более, чем где-либо, оказалась надуманной, искусственной, возвращающейся к метафизике.

Еще наивнее отдельные высказывания Ланжевена по вопросам исторического материализма и некоторым конкретным проблемам современной общественно-исторической действительности. Так, в статье «Наука и мир», опубликованной журналом «La pensée» в 1947 г., уже после смерти Ланжевена, невозможность войн в ближайшем будущем обосновывается автором тем ложным доводом, что... «они не могут итти дальше потому, что земля кругла».

Эти и другие высказывания Ланжевена легко подвергнуть критике. Но нетрудно убедиться, что они носят у него частный характер и обусловлены недостаточным знакомством с произведениями классиков марксизма-ленинизма.

Такого рода высказывания не умаляют силы и правильности критического анализа Ланжевена многих философских проблем современной физики, правильности избранного им пути.

Ланжевен действовал в определенной исторической обстановке и, понятно, не мог сделать того, что должно быть делом всего коллектива передовых ученых Франции и других стран, что должно явиться результатом развития борьбы авангарда передового общественного движения во Франции за диалектический материализм.

Важно то, что, борясь за материализм в науке, Ланжевен от буржуазно-демократических воззрений поднялся до революционного пролетарского мировоззрения.

Уже в ранних своих произведениях Ланжевен правильно указывал на неразрывную связь науки с общественным движением. Передовая наука, писал он, не может отгородиться от борьбы за социальную справедливость.

В то же время он ясно видел и понимал, что современный общественный строй капиталистических стран ставит науку на службу интересам эксплоататорского меньшинства.

Поэтому, когда возник великий Советский Союз, взоры Ланжевена обратились к стране социализма — стране, где наука поставлена на службу социальной справедливости, служит народу и где созданы все условия для невиданного ранее расцвета науки.

Ланжевен в течение последних 30 лет своей жизни неизменно выступал за признание СССР, за установление с СССР дружественных отношений, усвоение опыта борьбы в СССР за строительство социализма, за науку и культуру.

Он являлся председателем общества «Франция—СССР».

В докладе «Мысль и действие», прочитанном 10 мая 1946 г., за полгода до смерти, Ланжевен отмечал, что он еще в 1920 г. боролся и устно и в печати («Юманите») против того, что буржуазное правительство Франции противопоставляло учащуюся молодежь рабочим в качестве штрейкбрехеров. Ланжевен выступил в защиту Андре Марти, когда этот пролетарский революционер был привлечен к суду за организацию восстания французских матросов, посланных в Одессу для удушения социалистической революции в России. С этой защитой Ланжевен выступил публично на митинге в зале Ваграм, вызвав против себя преследование со стороны буржуазных правителей Франции.

Ланжевен решительно и смело выступал против фашизма в Германии, Франции и в других странах, борясь на стороне трудящихся масс, ибо он был убежден, что «...ввиду растущей опасности развития средств разрушения, угрожавшей человечеству в течение долгих лет, ...установить мир может и должна лишь воля народов» («Мысль и действие», стр. 436).

В 1932 г. Ланжевен вместе с Анри Барбюсом и Ромен Ролланом организует Амстердамский антифашистский комитет. Он был одним из организаторов Народного фронта во Франции.

Будучи в Китае в 1931 г., Ланжевен выступил против агрессии Японии в Маньчжурии. С решительным протестом выступил он против разбойнических, захватнических войн империализма и фашизма в Эфиопии, Испании, Австрии и Чехословакии.

«Однако, — говорил Ланжевен в том же докладе, — наиболее тяжелыми часами в моей жизни я считаю то время, когда мне пришлось в Комитете бдительности антифашистской интеллигенции бороться против тех, в большинстве случаев имевших хорошие намерения, кто считал возможным одновременно и бороться с фашизмом в нашей стране и сотрудничать с ним во внешних делах — во имя слепого, пагубного пацифизма. Такая политика стоила нам успеха Франко в Испании и позора Мюнхена» (стр. 436).

Формулируя общие задачи в области науки, Ланжевен в своей ответной юбилейной речи в 1945 г. говорил: «По примеру тех интеллигентов, которые во время «дела Дрейфуса» выступили в защиту индивидуальной справедливости, в наши дни задача творцов науки — добиться, чтобы достижения науки не использовались во вред человечеству. Движимый этим убеждением, я вот уже больше двадцати лет отдаю значительную часть своих сил защите социальной и международной справедливости в рядах Лиги прав человека под руководством Фердинанда Бюиссона и Виктора Баша. С самого возникновения Советского государства я следил за этим колоссальным экспериментом, и он возбудил во мне жгучий интерес, потому что это государство идет к справедливости, опираясь на достижения науки. По мере знакомства с идеями, лежащими в основе советского строя, моя связь с ними становилась все более тесной и завершилась моим недавним вступлением в Французскую коммунистическую партию» (стр. 42).

Когда Франция, в результате предательства со стороны буржуазии и ее правительства, была оккупирована гитлеровскими бандами, Ланжевен был арестован и посажен в тюрьму; затем, благодаря решительному протесту демократической общественности, из тюрьмы он был сослан в Труа, где находился около трех с половиной лет.

Перед крушением власти гитлеризма Ланжевен, когда все расширявшаяся волна репрессий стала угрожать его жизни, при содействии друзей бежал в Швейцарию.

После освобождения Франции от гитлеровской оккупации Ланжевен со всей страстью отдавал свои силы делу укрепления французской демократии; он многое делал для того, чтобы поставить науку и образование на службу народу.

Демократический лагерь во Франции встречает бешеное сопротивление со стороны фашиствующих элементов, предающих интересы французского народа американским империалистам. Но каковы бы ни были усилия этого реакционного лагеря, — дело коммунизма, которому посвятил себя Ланжевен, победит. Вся жизнь Ланжевена — яркое свидетельство того, что имеется один путь спасения народов, один путь расцвета науки — это путь, указанный Лениным и Сталиным.

А. Максимов.

П. ЛАНЖЕВЕН

*

ИЗБРАННЫЕ ПРОИЗВЕДЕНИЯ

ОТВЕТНАЯ ЮБИЛЕЙНАЯ РЕЧЬ П. ЛАНЖЕВЕНА *

Милостивые государыни, милостивые государи и дорогие друзья! Торжественная встреча, оказанная мне сегодня, могла бы окончательно смутить меня, если бы я не сознавал в глубине души, что вашей истинной целью является стремление в моем скромном лице воздать почтительную дань всем столь многочисленным научным работникам Франции, пострадавшим во время оккупации. В первом ряду их находятся герои и мученики, гибель которых обеспечила нам возможность сегодняшнего собрания. Мы свято чтим и всегда будем чтить их память. Мысль о них неизменно присутствует в наших сердцах и придает оттенок печали одушевляющим нас чувствам.

В переживаемое нами тяжелое время, когда мы стремимся найти выход из той пропасти, в которой мы очутились, и когда мы находимся в бою, далеко еще не законченном, следует приветствовать подобные собрания, во время которых оставшиеся в живых бойцы теснее сплачивают свои ряды и хотя бы на короткое время сильнее осознают объединяющие их связи.

Избрав меня сегодня в качестве предлога или символа, Национальный фронт научных работников хотел, как выразился мой друг Леблени, ознаменовать тот факт, что я был первым ученым, арестованным гестапо и смещенным со своего поста правительством Виши за антифашистскую и антигитлеровскую деятельность, проводимую мной еще до войны.

Я хочу воспользоваться представившимся мне исключительным случаем поделиться с вами некоторыми воспоминаниями и на закате моей жизни выразить благодарность всем тем, кто указал мне путь (уже приближающийся к концу), на котором мне было дано испытать великое счастье познания, преподавания и борьбы.

Как и многие из присутствующих сегодня в этом зале, я считал своим долгом посвятить свою жизнь в равной степени служению науке и справедливости. Это, несомненно, объясняется духом семьи, в которой протекло мое детство: между отцом — республиканцем до мозга костей и матерью, которая в своей преданности семье не останавливалась ни перед какими жертвами, а также тем, что я воспитывался среди прекрасного

* Речь, произнесенная на собрании, посвященном юбилею проф. П. Ланжевена и организованном Национальным фронтом научных работников. Перепечатывается из сборника «Hommage à Paul Langevin», «Front National Universitaire», Paris, 1945.— *Прим. ред.*

народа Парижа, сознание глубокой солидарности с которым никогда меня не покидало. Мой отец, который в силу обстоятельств принужден был в 18 лет бросить учение, передал мне глубокое стремление к знанию. Вместе с моей матерью он пережил осаду Парижа и кровавые дни подавления Коммуны, и их рассказы внушили мне отвращение к насилию и страстное стремление к социальной справедливости.

Как Вы упомянули в своей речи, дорогой ректор и друг, я не посещал средней школы и в течение всей своей жизни ощущал отрицательное и положительное влияние того сложного пути, который привел меня, наконец, в стены Высшей нормальной школы. Полученное мною образование на всех ступенях было бесплатным, и я, таким образом, как бы предвосхитил события и использовал, правда, с многочисленными трудностями, ту систему национального образования, которую мы теперь стремимся распространить на все население нашей страны. Позвольте мне воспользоваться случаем и выразить мою горячую благодарность городу Парижу за его материнскую заботу обо мне. Все три школы, в которых я учился, находились в ведении парижского муниципалитета, а впоследствии, после окончания Высшей нормальной школы, стипендия города Парижа дала мне возможность провести год в лаборатории им. Кавендиша в Кембридже, где окончательно определилось направление моей научной деятельности.

Основные переживания в моей научной жизни связаны, с одной стороны, с революционными фактами и идеями, вызвавшими полный переворот в физике в течение пятидесяти лет моего служения этой науке, а с другой — с драгоценной для меня дружбой людей, с которыми мне пришлось столкнуться в связи с моей научной работой; одни из них были моими учителями, другие — товарищами или учениками.

Среди моих учителей я назову только три имени: Пьер Кюри, с которым я познакомился в 1888 г., когда он работал в Школе физики и химии, — его благотворное влияние на меня не прекратилось и после его трагической гибели; затем — Марсель Бриллюен, преподавание которого в Высшей нормальной школе и Коллеж де Франс заставило меня заинтересоваться теоретической физикой. В настоящее время он, несмотря на 90-летний возраст, сохранил всю свою активность; и только обстоятельства, задержавшие его вдали от Парижа, помешали ему сегодня присутствовать среди нас. Наконец, Дж. Дж. Томсон, гостеприимно встретивший меня в Кембридже 48 лет назад и с которым я успел повидаться в последний раз в 1940 г. за три месяца до его смерти.

Из друзей моего возраста, имевших благотворное влияние на мою работу, я назову здесь лишь самых близких. Это, во-

первых, друг моего детства Жорж Урбен, одаренный исключительно живым умом и богатыми способностями; он умер семь лет тому назад, прожив жизнь, всецело посвященную науке и искусству. Затем в Высшей нормальной школе — Жан Перрен, отсутствие которого так тяжело переживается всеми нами; с ним 50 лет тому назад я сделал свои первые шаги на научном поприще. Тогда же я встретился с тобой, мой дорогой Коттон, в лаборатории Нормальной школы, где ты заканчивал свою докторскую диссертацию. У меня до сих пор звучит в сердце твое приветствие, обращенное ко мне на «ты» по традиции Нормальной школы и подействовавшее так ободряюще на робкого новичка. Наконец это Пьер Вейль, часто посещавший эту лабораторию, в которой наши мировые линии, как мы говорим в теории относительности, впервые встретились, чтобы потом неоднократно пересекаться в дальнейшем.

Моими учениками в Коллеж де Франс и в Школе физики и химии было большинство молодых ученых, составляющих ныне славу Франции. Из них трое, наиболее мне близких, выступали здесь перед вами. Это Фредерик Жолио, Рене Люка и Жак Николь. Их присутствие смягчает, насколько это возможно, неутешное горе, вызванное гибелью три года тому назад моего духовного сына, ставшего мне еще ближе благодаря его браку с моей дочерью; я говорю о Жаке Соломоне — таком чистом, мужественном и так блестяще одаренном.

Удовольствие, которое всегда доставляла мне преподавательская деятельность, никогда не было так сильно, как в течение 25 лет моего преподавания в женской школе в Севре. Ясно чувствовалось, с какой горячностью молодые девушки воспринимали новые идеи и как они своим неослабным старанием стремились высказывать мне свою благодарность за попытку несколько шире приоткрыть перед ними двери храма науки, чем это разрешала официальная программа. Там мне удалось завязать дружеские отношения, между прочим, с мадам Коттон, занявшей после моего ухода место директора школы и также связанной со мной тесными семейными узами.

К нелегкому делу преподавания побудило меня обратиться глубокое убеждение в возможности и необходимости поставить настоящую науку и все высшие достижения культуры в распоряжение широких народных масс; именно в результате этого я в настоящее время имею честь участвовать, поскольку это позволяет состояние моего здоровья, в великом деле перестройки народного образования в нашей стране на истинно демократической и гуманитарной основе. Справедливость в школе — необходимое условие социальной справедливости — является одним из тех связующих звеньев, которые призваны соединить науку и справедливость.

Греки, сделавшие Минерву одновременно богиней науки и справедливости, хотели, по всей вероятности, выразить тем самым, что одно не может существовать без другого и что человечество страдает, когда оружие, созданное наукой, не направляется всецело на служение справедливости.

За последние 200 лет развитие науки шло таким быстрым темпом, что справедливость, которая, кстати сказать, всегда немного прихрамывала, не в состоянии была итти с ней в ногу, в результате чего наши социальные и интернациональные учреждения значительно отстают от наших научных возможностей действия.

Для восстановления гармонии необходимо, чтобы наука протянула руку справедливости, что должно выразиться в приложении научных методов к проблемам человеческих взаимоотношений, а также в развитии гражданского самосознания у всех занимающихся наукой.

По примеру тех интеллигентов, которые во время «дела Дрейфуса» выступили в защиту индивидуальной справедливости, в наши дни задача творцов науки — добиться, чтобы достижения науки не использовались во вред человечеству.

Движимый этим убеждением, я вот уже больше двадцати лет отдаю значительную часть своих сил защите социальной и международной справедливости в рядах Лиги прав человека под руководством Фердинанда Бюиссона и Виктора Баша.

С самого возникновения Советского государства я следил за этим колоссальным экспериментом, и он возбудил во мне жгучий интерес, потому что это государство идет к справедливости, опираясь на достижения науки. По мере знакомства с идеями, лежащими в основе советского строя, моя связь с ними становилась все более тесной и завершилась моим недавним вступлением в Французскую коммунистическую партию.

В истории человеческого прогресса эти идеи являются дальнейшим развитием в применении к новым условиям основных положений французской философии XVIII в. Я благодарен им за то, что они открыли мне глаза на эволюцию моей собственной науки и укрепили мою веру в будущее человечества.

Эта вера не была поколеблена в течение тех лет борьбы, через которые нам пришлось пройти. Она всегда служила мне поддержкой в тяжелые минуты. Она еще более возрастает при виде того единодушия, которое объединяет нас сегодня в стремлении к общей цели. Она должна поддержать нас и придать нам силы для защиты от любой агрессии сокровищ науки и культуры, которые накоплены неустанным трудом многих предшествующих поколений и которые мы должны передать нашим детям, прибавив к ним еще немного справедливости и любви.

Благодарю вас всех от всего сердца.

ДУХ НАУЧНОГО ОБРАЗОВАНИЯ *

Введением физических наук в среднюю школу преследовалась двойная цель: воспитательная и утилитарная. Признано, что для умственного развития полезно и необходимо изучение методов и результатов экспериментальных изысканий, работы ума в его постепенном усвоении реальности.

Наряду с этой внешней и критической точкой зрения растущие потребности современного общества, все более и более определенные и настоятельные требования промышленности поставили перед школой и другую задачу — задачу подготовки к работам в области техники с тем, чтобы суметь использовать ту власть над внешним миром, которую дает наука. Навстречу этим новым задачам высшее образование идет всюду. Университеты организуют различные технические курсы, помимо высших школ, специально для этого предназначенных. Среднее образование, будучи менее подвижным, в котором колебания являются одновременно и более широкими и более медленными, повидимому, и до сего дня осталось верным своему классическому, критическому и спекулятивному направлению.

Хотя, в связи с введением новых учебных программ, научное образование в средней школе и улучшилось, тем не менее оно, мне кажется, не соответствует ни одному из двух требований, о которых я говорил выше, — и прежде всего ввиду его догматического и отрывочного характера.

Я хотел бы вместе с вами наметить пути, как сделать его более синтетическим и более живым, удовлетворяющим одновременно многочисленным требованиям культуры и деятельности.

Будучи согласен в этом с концепцией о том, что воспитывать — это значит готовить к деятельности, я не думаю, чтобы в научных вопросах было целесообразно организовывать одновременно две различные системы образования: одну — спекулятивную, другую — практическую, одну, дающую дух, другую — букву, одну, дающую метод, другую — результат. Ибо это приводит к тому, что ограничивается горизонт, многое теряется с

* Доклад, сделанный в Педагогическом музее в 1904 г.; публикуется с некоторыми сокращениями. — *Прим. ред.*

точки зрения обеих систем, не сохраняется точное равновесие, которое обеспечивает непосредственный характер и полезность обучения.

Действительно, воспитательное значение науки важно как в самом открытии, так и в том усилии, которое позволяет его достигнуть; в выражении законов, как и в их истории; в перспективе, которую их совокупность открывает в реальности; в непосредственном контакте с фактами, так же как и в том обучении, которое служит для их получения.

Эти две стороны научного обучения неотделимы одна от другой, как два условия одного равенства, как вопрос, поставленный теорией дедуктивным путем, неотделим от ответа, даваемого нам опытом, и от закона, получаемого индуктивным путем; как внутреннее представление, которым является наша наука, неотделимо от представляемых фактов.

С другой стороны, для технической подготовки учащемуся с самого начала обучения необходимо дать теоретическую базу — прочную и широкую, насколько это возможно; и это — задача средней школы.

Кто ежедневно пользуется результатами научных исследований, тот должен относиться к ним с тем осторожным и обдуманным доверием, которое в состоянии обеспечить критическое отношение к ним. Из истории науки он должен знать, где кончается сфера применения законов, чтобы не пытаться, как это слишком часто делается, давать этим законам незакономерное расширение и не потерять ориентировку, когда он увидит факты в очевидном противоречии с этими законами.

Повидимому, научное обучение по своей природе должно быть в той же мере однородным, как и общество, в котором мы живем, и без опасности искажения мы не можем приспособить его с самого начала, с обучения в школе, к слишком узким границам различных потребностей учеников, получающих такое образование.

Преобладающей чертой учебников физики является (от начала до конца книги) перечисление фактов и законов без большой перспективы, как, например, в электричестве, где развертывается внушительный кортеж странных законов и новых величин с их основными единицами. Этот характер работ, повидимому, определяется стремлением к слишком большой, быть может, преждевременной строгости. Положение дела, как сказал А. Пуанкаре, ухудшается еще и тем, что изложение законов дается чаще всего в догматической форме, формулировка законов появляется неизвестно откуда, а физик в качестве подтверждения ссылается на опыт.

Хорошо еще, если он, сделав эту проверку, добавляет, что высказанный им закон не является абсолютно строгим, что дог-

ма требует дополнения, противоположного ее смыслу, и что, кроме всего, мы оказываемся неспособными сделать это дополнение. Таков, например, закон Мариотта, которому опыты противоречат и от которого в уме ученика не остается ничего, кроме сложного описания приборов. Если только догму не ставят, как это ей якобы полагается, выше всякого подтверждения, выше всякого вопроса о ее возможном расширении, то ее подают, если это не скрывается, в метафизической форме: экспериментальные факты неизменяемости веса при изменении характера соединения или температуры облекаются в принцип сохранения вещества и рассматриваются как необходимые; экспериментальный факт эквивалентности энергетических превращений облекается в принцип сохранения энергии. Отсюда те неудобства, которые влечет за собой расширение смысла плохо определенных слов и лапидарных, но неточных выражений.

Большая часть учеников, обманутых поспешным отождествлением механической массы и количества материи, рассматриваемой как неразрушимая, считает априори очевидной неизменяемость массы и веса при изменении температуры; хотя этот экспериментальный факт чрезвычайно удивителен, однако он часто используется, например, в законе изменения плотности тел в зависимости от температуры.

Ученик уносит от всего этого впечатление, что физики представляют собой своеобразную секту верующих, которые забавляются только тем, что смотрят сквозь особые очки и строят кривые настолько же расточительно, насколько и бесполезно.

Что же касается будущего техника, то он выходит из школы, нагруженный целой коллекцией законов и формул, о которых он будет знать, что они большей частью неправильны, но не будет знать, почему и в каком именно смысле.

Специальное высшее учебное заведение внесет свою лепту еще и тем, что увеличит количество фактов, которые учащийся накопил в своей памяти, но едва может удержать, поскольку у него не имеется связи, которая бы объединяла их между собой, — фактов, которые нужны сегодня, но окажутся бесполезными завтра ввиду постоянных и резких изменений в современной промышленности.

Общие идеи, ясные и хорошо сгруппированные, наоборот, дадут учащемуся достаточную гибкость, чтобы усваивать факты по мере надобности, а живое чувство прогресса позволит ему легко отбрасывать груз переживших себя понятий; в то же время «неизменные» догмы могут разбиться только при столкновении с противоречащими им фактами, делая того, кто их усвоил, совершенно безоружным и счастливым уже тем, что он сам не подвергся подобной перманентной деформации.

Я вспоминаю — и это вспоминают, безусловно, многие — то впечатление от законченной и мертвой науки, которое дает догматическое преподавание законов и фактов. Такое преподавание как бы заставляет самих ученых способствовать окостенению принципов и догм; и здесь сказывается непонимание механизма научной жизни — этой беспрестанной работы внутреннего умственного построения, отталкивающейся от все более и более точных гипотез. Как известно, следить за развитием этих гипотез помогает нам математическая физика, и выводы из них экспериментатор должен сравнивать с фактами, внешними по отношению к нам, постоянно ставя при этом вопросы, обращенные к природе, покрывая ее все более и более тонкой сеткой, последние волокна которой тесно связаны с основными фактами.

За исключением некоторых существенных устоев, некоторых общих принципов, к которым я вернусь ниже, все остальное находится в беспрестанном изменении; мы верим, что мало-помалу побочные ветви этих принципов установятся, чтобы обрести, сделавшись, может быть, менее живыми и менее цветущими, силу и крепость своих старших предшественников — математических аксиом.

Действительно, наша наука находится еще в детском состоянии, хотя уже достаточно выросшем, — а ее одевают уже как старика. Ее лепет производит впечатление отталкивающей старости вместо той радости, которую юность распространяет вокруг себя в своих пылких усилиях.

Во всех случаях основной целью обучения должна быть передача понятия о том живом и постоянном усилии, которое делает наука, чтобы приноравливаться к внешним реальностям и чтобы строить гармоничное здание нашего представления, исходя из принципов или гипотез, высказываемых разумом, который направляется экспериментальной индукцией.

В то же время будущего техника должны снабдить вместо громоздкого багажа формул и фактов, не имеющих между собой связи, удобным и — я настаиваю на этом — легко ремонтируемым инструментом; когда будущий техник хорошо ознакомится с тем, как этот инструмент изготовляется, он хорошо будет знать, как его применить, и по мере научного прогресса приучит себя к мысли, что никаких окончательных формул у нас нет.

Я не думаю, что присущий основным научным представлениям характер непрерывной эволюции, имеющей неодинаковую скорость в различных областях, должен систематически исключать из обучения эти импозантные конструкции, хотя и являющиеся в некоторой своей части предварительными, но представляющие собой самый яркий результат научных побед. Наиболее важными являются, с одной стороны, механика, а с другой — атомистическая концепция. Обе они группируют большое коли-

чество фактов в различных областях: первая — более поверхностно, вторая — более глубоко. Хотя их структура и их действенность сравнимы между собой со всех точек зрения, однако к ним относились совершенно различно. Можно противопоставить то исключительное благоволение, которым пользуется механика благодаря темноте, которой окружают обыкновенно ее истоки и пределы ее применимости, — и ту немилость, в которой держат атомистику. Обе они могут оказать большие услуги для координации законов, если из формулировок будет удален всякий догматизм. Необходимо показывать, как обе они покоятся на экспериментальной индукции, имеющей ограниченную область распространения, как они живут и преображаются, а не создавать из них системы, окоченевшие во мраке смерти, как это делается с механикой, или же демонстрировать от них только разрозненные части, подобные анатомическим препаратам.

Таким образом, будет разбужена любознательность учеников, и они легче поймут последующий путь идей и лучше будут подготовлены для того, чтобы самим пользоваться тем инструментом, о котором я говорил выше. В таком случае они не останутся беспомощными, если факты окажутся в противоречии с одним из законов или одной из формул, которыми они вооружены: живое существо заживляет свои раны.

Единство и жизнь — условия, необходимые и ни в коем случае не противоречащие друг другу, которые, повидимому, до сих пор еще не осуществлены. Каким же образом этого можно достигнуть?

Начнем с главных устоев, общих принципов, которые доминируют над всякой экспериментальной наукой и стоят выше всякой механики, а именно — с принципа эквивалентности и принципа Карно.

Вопреки своему историческому происхождению, первый принцип, как это показал Перрен в своей книге *, ни в коем случае не предполагает законов механики, и вмешательство последних может привести только к нелепостям. Этот принцип вытекает исключительно из мощной индукции, объединяющей часть векового опыта и завершающейся понятием цены, за которую покупается трансформация, понятием относительной стоимости изменений, которым подвергается материя. Можно утверждать, что если какая-либо трансформация, например падение какого-либо весомого тела, сопровождается, скажем, только таянием определенного количества льда, то окажется невозможным, — как бы мы за это ни брались и каковы бы ни были механизмы, использованные для этого, — соединить эту же трансформацию

* *Jean Perrin,* Les Principes, Gauthier-Villard, 1903.

с таянием другого куска льда. Обратная трансформация должна сопровождаться затвердеванием такого же колнчества воды.

Таким образом, можно определить ту цену, которой покупается данная трансформация, измерить ее неизменную стоимость посредством общей меры, например посредством растаявшего льда, и однозначно определить энергию, потерянную в ходе этой трансформации, как пропорцнональную весу расплавленного льда. Из самого принципа эквивалентности вытекает, что это измерение независимо от частного явления, взятого в качестве общей меры. Энергия не является больше «чем-то, что́ остается постоянным»; относительное значение трансформации одновременно дает нам точное о ней понятие н ее меру.

Принцип Карно, имеющий аналогичную природу, ведет нас несколько дальше. Он позволяет утверждать, что из двух противоположных превращений, не сопровождающихся никакими внешними эффектами, возможно только одно: напрнмер, нз двух явлений — взаимной диффузии двух газов в их постоянном общем объеме и спонтанного разделения этих газов — возможно только первое. Другими словами, достаточно сложная система не проходит два раза через одно н то же состояние; эволюция имеет место в определенном порядке, нсторня не повторяется.

Ничего другого в принципе Карно нет, и его обычное изложение представляет собой только частный случай общего закона. Мне кажется, что многочисленные соображения говорят за то, что этот прннцип необходимо ввестн в школьное обучение, дав ученнкам возможность понять его дух. Кроме применения в теории тепловых двигателей, этот принцип прнменяется в электростатике; существование потенциала электрнческого поля, рассматриваемого в электростатике, является его непосредственным и простым следствнем. Хнмические явления, что я покажу ниже, также дают бесчнсленное количество его прнменений.

Воспнтательное значение этих двух принцнпов неоспоримо. Первый принцип говорнт: результат получается ценой уснлия — чудес не существует; а второй: действия непоправимы — течение жизнн не может быть начато сначала. Более того, они дают прекрасный прнмер индуктивного метода в нстории их прогрессивного развнтия и, повидимому, окончательно останутся в качестве основы нашего представления о внешнем мире. Это — главные столпы, независимое существование которых от всякой последующей механической или другой конструкции, мне кажется, необходимо установить прежде всего. Было бы правильным присоединить сюда н третий существенный принцип, который

обычно обходится молчанием, — *принцип симметрии*, впервые точно изложенный Кюри *.

Этот принцип объявляет невозможным существование явления, если среда, в которой его ищут, не представляет собой наличия минимальной дисимметрии, характерной для искомого явления: дисимметрия следствий должна предсуществовать в их причинах.

Так, невозможно, чтобы электрическое поле — величина направленная, не налагаемая на свое зеркальное изображение и перпендикулярная его направлению — образовалось перпендикулярно плоскости симметрии среды; и наоборот, для магнитного поля это возможно.

Этот принцип, родственный двум предыдущим, подобно им, не ограничивает область возможного и начинает уточнять наше понятие о вселенной.

Ввиду исключительной общности этих принципов, вполне понятны гибкость и плодотворность их применений; но особенно яркими становятся они тогда, когда их освобождают от механических пеленок, в которых они, возможно, выросли и в которых слишком часто представляют их нам еще и сейчас.

Применение этих принципов к химическим явлениям (знаменитая работа Гиббса) обновило химию, однако отклик этого, повидимому, сильно запоздал и не чувствуется в преподавании, которому такое применение могло бы придать исключительную ясность и единство.

Но, будучи необходимыми, эти принципы, однако, не являются достаточными и образуют собой только ствол, на котором должны развиться ветви, в противовес тому, что думают современные евангелисты, которые, упуская из вида происхождение принципа, делают из энергии нового идола, многочисленные воплощения которого якобы достаточны для того, чтобы представить все явления природы.

В статье, вышедшей в 1896 г. в «Revue générale des Sciences», Оствальд говорит: «Энергетика изобретает символы, но, в отличие от науки предшествующих времен, она заботится особенно о том, чтобы эти символы не содержали ничего больше и ничего меньше, как только факты, подлежащие изображению». И дальше: «Оптическая теория будущего не будет знать в пространстве ничего, кроме энергии, плотность которой будет периодической функцией времени и координат, и эта функция объяснит все, что мы знаем относительно физических свойств света».

Для тех, кто знает богатство и сложность физических явлений, эти «ничего меньше» и «все» покажутся, несомненно, несколько чрезмерными.

* *P. Curie*, Journal de physique, 1894.

В несколько другом смысле эти различные воплощения энергии являются основой того, что Дюгем излагает и защищает с таким искусством под именем *физики качества* *, ссылаясь при этом на Аристотеля, чтобы заменить измеримую величину — качеством, которое он тем не менее выражает в числах, отказывая ему в то же время в аддитивности. Что будет означать в таком случае сложение двух чисел, определяющих две различные степени одного и того же качества?

Вместе с Дюгемом мы, следовательно, должны допустить следующее: «Если в процессе дедукций, при помощи которых развертывается теория, мы подвергаем каким-либо операциям или расчетам величины, на которых основывается теория, то не следует спрашивать, имеют ли эти операции или эти расчеты физический смысл».

Более того, в этой системе физик объявляет себя удовлетворенным, если сложные и новые явления представляются новыми членами в уравнении, членами, произвольная форма которых указывается только поверхностными аналогиями.

Не скрывается ли в этом прискорбная тенденция ограничить поле изысканий, объявить достаточным и окончательным общее и поверхностное познание вещей, запретить себе более глубокое изучение только потому, что первый успех дал нам в руки некоторые из наиболее общих законов?

Знаем ли мы, что нам даст наше движение вперед, изучение под микроскопом живого организма? Какие мотивы боязни нами руководят? Зачем этот поворот назад, этот ignorabimus, против которого протестуют наши инстинкты и наши убеждения? Мы рождены в ходе медленной эволюции, в непрерывном и глубоком контакте со вселенной, которая нас сформировала; из наших неясных инстинктов вытекает чувство тождественности и общности со всей природой. Наше знание является усилием, которое все более глубоко и более сознательно проникает в природу, и мы с трудом позволяем возводить барьеры нашему познанию и ставить границы непознаваемому из боязни, быть может, того, что находится за этими границами.

Если считать, что мы и до сих пор находимся все еще на поверхности вещей, тогда ничто не может заставить предвидеть будущие открытия, новые впечатления, которые мы должны будем классифицировать; гипотезы, которые кажутся наиболее смелыми, являются только предвидением этих новых впечатлений, и для того, чтобы итти в ногу, мы должны быть готовы изменять наши построения, поскольку это будет необходимо.

В настоящее время происходит революция именно такого рода. Она выводит атомистические идеи из той тени, в которой их

* *P. Duhem,* Revue générale des Sciences, 1903.

оставляли для того, чтобы привести в соприкосновение с новыми фактами и перевести из *области гипотез в область принципов,* для того, чтобы показать, что кроме энергетики нужно еще и что-то другое.

Это построение я и хочу сейчас рассмотреть, сравнивая между собой механический и атомистический синтезы как продолжение общих принципов.

Механика, безусловно, дает наиболее замечательный пример синтеза, группирующего ограниченное количество фактов, а именно тех, которые относятся к движению материи, взятой в большом количестве, молярно. Благодаря гениальной индукции своих творцов механика позволяет, исходя от созданий разума, определений и аксиом, сконструировать дедуктивным путем исключительно точное представление отдельных фактов, которые этого потребовали. Нельзя, однако, не признать, что все это имеет совершенно поверхностный характер, хотя, как мы увидим ниже, делались постоянные попытки обобщения для того, чтобы вывести механику из той узкой области, в которой она была создана. Всякий синтез, всякая теория, так же как и всякое живое существо, обладают подобной внутренней силой экспансии. Оправдывается ли эта экспансия по праву, как и фактически? Кажется, нет. Ясность основных понятий по праву, успех экспансии фактически — этого механике, повидимому, приписать нельзя.

Прежде всего, она с самого начала допускает глубокие неясности, относящиеся частично к остаткам теологических и антропоморфических концепций своих основателей (Декарт доказывал сохранение количества движения совершенством божества, а Мопертюи оправдывал принцип наименьшего действия простотой деяний «творца»), а частично к самой природе вещей. Как, например, изложить удовлетворительным образом принцип инерции, не прибегая к догматической форме: существует система осей, определенная как неподвижная или же движущаяся равномерно и прямолинейно, по отношению к которой тело, удаленное от всякой другой материи, движется по прямой линии с постоянной скоростью.

Из признаний самих механистов вытекает, что основные понятия механики могут приобрести полную ясность только при условии поисков точки опоры, внешней и предшествующей, например в электромагнитных понятиях.

Более того, известно, что после замечательного успеха ньютоновской гипотезы физики XVIII и начала XIX в. возымели надежду представить все процессы природы аналогичным образом, всюду воображая центры притяжения и создавая механические понятия о массах и силах, рассматриваемых в качестве первоначальных, как основы всякого научного объяснения.

Многочисленные неудачи этой молекулярной физики, этого распространения механики за пределы движения обычного вещества, взятого молярно, неудачи, например, как в представлении явлений упругости, так и в построении теории светового эфира, несмотря на усилия Френеля, Стокса, Кельвина и многих других, повидимому, окончательно осуждают попытки такого рода. Английские физики являются, вероятно, последними, которые сражаются за это: исключительная сложность представлений и, как хорошо заметил А. Пуанкаре, неопределенность решений, если только они вообще существуют, утомляют даже наиболее храбрых. Большая надежда в этом отношении возродилась в результате работ Максвелла, показывающих глубокую аналогию уравнений электромагнетизма и механики, но она оправдывает также и противоположную тенденцию, которая в настоящее время кажется более плодотворной, а именно: рассматривать механику как следствие и поставить в первый ряд электромагнетизм, связанный с атомистикой.

Я предоставляю слово Маху, которого нельзя заподозрить в предубеждении против механики. Вот что он писал задолго до появления современных тенденций: «Взгляд, который делает механику основой всех остальных отраслей физики и согласно которому все физические явления должны получить механическое объяснение, по нашему мнению, является предрассудком. Наиболее старинное (с исторической точки зрения) познание не обязательно должно оставаться основой понимания фактов, открытых в более позднее время. По мере того как для нас будет открываться все большее и большее количество явлений и когда они будут распределены по категориям, должны появиться и установиться новые направляющие концепции. Сейчас еще нельзя сказать, какие физические явления проникают в природу вещей наиболее глубоко и не являются ли, в действительности, механические явления как раз именно наиболее поверхностными из всех».

Взгляд, о котором говорит Мах, еще и теперь настолько распространен, что обычно совершенно скрывается предварительный характер механического построения, особенно в области преподавания механики. Во Франции механику излагают всегда в догматической форме — не восходя достаточно далеко, к ее опытному происхождению, не заботясь о тех нелепостях, которые она несет с собой с самого начала, и не указывая пределов значимости ее следствий, ограниченных областью общих движений, без испускания излучений и при малых скоростях. Более того, была сделана попытка сгруппировать вокруг механики другие науки, создавая, таким образом, в будущем громадные трудности для тех, кто получит такое образование, ибо можно же допустить, что механика перестанет занимать это центральное положение.

Вот, например, что говорит Корню в своей статье, относящейся к политехнической школе *:

«Курс физики должен иметь уклон в сторону механики. Общая тенденция должна быть такова, чтобы показать, каким образом факты, объединенные эмпирическими законами, в конце концов возвращаются в лоно законов рациональной механики». И он предлагает:

«1) Рациональная механика является базисом политехнического образования.

2) Учитывая ограниченное время, обучение всем другим наукам должно быть ориентировано таким образом, чтобы облегчить, иллюстрировать или дополнить курс рациональной механики. Таким образом, при выборе материалов, подлежащих введению или устранению, окончательным критерием должны быть соображения об их важности с точки зрения обучения механики».

Затем идет следующее, что уже более непосредственно касается среднего образования:

«Подготовительное к политехнической школе образование оказывает решающее влияние на ум учеников. Оно должно быть направлено на то, чтобы давать результаты, формирующие интеллектуальный инструментарий, который будет служить ученику в течение всей дальнейшей его карьеры; эти результаты должны быть достигнуты простыми и общими методами и представлены в окончательной форме, следуя которой они и будут применяться в дальнейшем: необходимо тщательно устранять *не только ненужные мелочи, но и тот сам по себе важный материал, который не будет, однако, иметь отношения непосредственно к направлению политехнического образования*».

То есть — механики.

Благоразумно ли это? Не лучше ли было бы, признавая всю важность механического синтеза в его обособленной области, сохранить за ним его ограниченный и предварительный характер?

Хотя механика, повидимому, и не может служить основой для полного понимания физических явлений, тем не менее нельзя отрицать замечательного успеха ее применения в кинетической теории газов, где относительная простота условий, вытекающих из взаимной независимости частиц, делает плодотворным распространение на эти частицы обычных законов механики по меньшей мере в качестве первого приближения. Однако до сих пор это единственная область, общая и для механики и для атомистики; одна кончается там, где начинается другая. В химии так же, как и в физике: когда речь идет о внутренних изменениях

* «Revue générale des Sciences», 1896, p. 898.

вещества или о явлениях, которые, подобно свету, раскрывают ее глубокую структуру, механика становится недостаточной, и в силу вступают атомистические идеи.

Прежде всего, я хотел бы указать на причины столь малого успеха атомистических идей во Франции, в особенности в школьном обучении, где они могут оказать громадные услуги. Я хотел бы кратко расмотреть критические выступления, вызванные самими же этими идеями, и напомнить, что новые открытия приносят им блестящее подтверждение, которое, несомненно, должно ободрять нас в желании предоставить им в обучении заслуженное место наряду, а возможно, и выше механики, с которой их, в известном смысле, слишком часто путали.

Совершенно необходимо отметить, что эти идеи, использованные в точной форме впервые Бернулли и его последователями в кинетической теории газов *, вытекают из основных законов химии, в частности из закона кратных отношений, который вводит бросающуюся в глаза прерывность, непонятную без их помощи, и из замечательных законов электролиза Фарадея, в которых снова обнаруживается та же прерывность и которые необходимо объединяют атомную структуру материи с атомной структурой электричества.

Несовершенная кинетическая теория газов еще и до сих пор помогает нам понимать закон Мариотта и отклонения от него, понять которые иным путем невозможно.

Когда — благодаря этой теории — ученик поймет, чем объясняются давление газов, их одинаковое расширение, их нагревание при сжатии — явления, объяснимые при помощи совершенно элементарных процессов; когда он поймет, в каком смысле Ван дер Ваальс при помощи этого закона предусматривает отклонения, наблюденные Реньо и др.; когда он поймет точный смысл объемных законов Гей-Люссака и гипотезы Авогадро и Ампера, настолько своеобразной, что теперь, как правило, стараются не говорить о ней, несмотря на ее существенное значение, — не получит ли тогда ученик более точное и более убедительное знание фактов и законов?

При этом выигрывают в ясности и в единстве вся химия, физика газов, теория теплоты и электричества — сегодня в электролизе, а завтра во всем своем объеме. Какие только затруднения не испытываются, если основы химии пытаются излагать без понятия атомов, и как радуются, когда их не приходится скрыто вводить, давая без всяких других объяснений следующее определение: «Атомный вес есть наименьшее количество простого тела, которое может войти в соединение».

---

* Первый набросок кинетической теории вещества дал **великий русский** ученый М. В. Ломоносов. — *Прим. ред.*

Далее, достаточно видеть, с какой жадностью к истине ученики хватают несколько очень туманных указаний, которые можно себе позволить по этому вопросу, указаний, в которых они с радостью находят недостающую им опору, — достаточно это видеть, чтобы быть убежденным в том, что в школьном обучении добровольно отказываются от весьма мощного рычага из-за абсолютно преувеличенного, скрупулезного стремления к строгости и вследствие несправедливого недоверия, которое заслужили эти гипотезы.

Откуда идет это недоверие, чем оно объясняется? Оно имеет многочисленные причины, и все они, по-моему, не выдерживают критики. Достаточно прочитать отдельные документы той кампании, которую энергетисты подняли против атомистической идеи, чтобы убедиться в том, что — сознательно или несознательно — они обвиняют эту идею в неуспехе и в претенциозности, в которых на самом деле повинна только механика, потому что ее преждевременно вьели в не относящуюся к ней область.

Атомистическая идея может остаться законной и плодотворной даже и в том случае, если средства, употребленные для проверки ее отдаленных следствий, оказываются не вполне подходящими.

В этом смысле мы уже не зависим от старой механики, и связь, открываемая теперь учеными между наэлектризованными центрами, из которых построены атомы, и электромагнитным эфиром, определяющим законы их движений, показывает нам вполне ясный и плодотворный путь. Теоретическая несостоятельность молекулярной физики, в которой зерна, составляющие вещество, предполагались обладающими силами, действующими лишь в функции расстояний, рассматривалась как решающий довод против атомистической гипотезы, однако следует сказать, что эта несостоятельность вытекает исключительно из одной слишком частной концепции и неоправдываемого расширения применения механики Ньютона. Нельзя забывать, что именно это и есть существенный аргумент, одна из причин того недоверия к атомистической теории, которое восходит к середине прошлого века и которое сделалось более глубоким благодаря удивительному успеху термодинамики и электромагнитных теорий, отвлекших внимание от атомистических идей. Но чтобы итти сегодня вперед, повидимому, необходим возврат к атомам.

Кинетической теории также был брошен упрек в исключительной сложности расчетов, к которым она приводит, когда хотят притти к более отдаленным следствиям или придать большую точность ее изложению. Однако известно, что природа не знает трудностей анализа. Все это внутри нас, и чем выше мы воздвигаем здание нашего представления, тем больше трудностей в подъеме новых камней.

Более серьезные аргументы против атомистической теории выдвигаются ссылкой на авторитет установленных принципов — таких, как принцип Карно, и притом в случаях, которые находятся за пределами опытов, выявивших эти принципы, и за пределами их применяемости.

Чтобы ответить на тонкую и остроумную критику Липпмана в его «Докладе конгрессу 1900 года», необходимо вспомнить, что принцип Карно предполагает достаточную сложность системы, к которой он применяется: два небесных тела или два атома, следующие законам тяготения, могут, в противоречии с этим принципом, возвратиться в свое исходное относительное положение и возобновить свою историю. В этих возражениях имеется злоупотребление авторитетом принципа: принципы, являющиеся завершенными гипотезами, не должны ставить себя в оппозицию к развитию других гипотез, тем более при помощи необоснованного распространения за пределы области их применяемости; завершенные гипотезы построены так же на основе опытов, как и гипотезы, которые живут и борются, сменяя собою прежние.

Наоборот, кинетическая теория представляется нам единственной, которая способна придать принципу Карно его настоящее значение; рисуемая ею сложная система имеет тенденцию к конфигурации максимальной вероятности, и, согласно Больтцману и Планку, энтропия, непрерывное возрастание которой утверждает принцип Карно, измеряет просто логарифм этой вероятности. Единственное направление, в котором принцип Карно утверждает возможность эволюции достаточно сложной системы, определяется возрастанием этой вероятности. Полностью диффундировавшая смесь двух газов, естественно, более вероятна, чем их произвольное разделение на две соседние части в одном и том же сосуде. Громадное количество молекул — это единственный фактор, который придает изменениям энтропии в определенном направлении характер непрерывности и абсолютной достоверности.

Явления броуновского движения как раз и представляют собой пример, когда сложность системы является недостаточной для того, чтобы принцип Карно мог бы быть применен.

Кроме услуг, которые атомистическая идея может оказать нам в своей первоначальной и гипотетической форме, вполне оправдываемой ее объединяющей силой, против которой нельзя было бы высказать никакого серьезного возражения, появились еще и новые факты, о которых совершенно необходимо указать даже в курсе школьного обучения и которые, как я уже сказал, должны перевести *атомы из ранга гипотез в ранг принципов*. Простота этих фактов и их чисто экспериментальный характер позволили бы использовать их немедленно; и я напоминаю о них главным образом для того, чтобы показать, какую ценную под-

держку дают они для использования — без колебаний — атомистического синтеза, прочно установленного на этой новой базе.

Я хочу сказать о недавно проведенных опытах с газами-проводниками; сравнение, заимствованное из бактериологии, даст нам возможность понять всю их важность.

Если бы микроскоп не давал возможности индивидуально различить бацилл, последние остались бы, подобно атомам, в качестве гипотез, несмотря на четкость опытов Пастера и его учеников. Но блестящее доказательство гипотезы о прерывности бактериальных зародышей было бы возможно и путем открытия, без помощи микроскопа, бактериальных колоний; конечное число пятен, образующихся в соответствующей среде, было бы существеннейшим аргументом в пользу конечного числа зародышей; количество колоний, видимых невооруженным глазом, могло бы позволить сосчитать количество самих бацилл. Однако мы теперь умеем формировать атомные колонии и при их помощи научились считать атомы; мы научились твердо стоять на зыбкой почве молекулярных величин, используя явления конденсации пересыщенных паров в газах-проводниках электричества. Пар, приведенный внезапным охлаждением в состояние пересыщения, не образует тумана в газе, лишенном пыли, вследствие отсутствия зародышей, необходимых для образования капель; в то же время обильное облако образуется в том случае, если газ превращен в проводник при помощи какого-либо процесса, например лучей Рентгена или лучей радия. Опыт позволяет подтвердить, при помощи электризации капелек, что эти капельки образуются, в соответствии с предвидениями термодинамики, на заряженных центрах, которые всегда имеются в конечном числе и присутствие которых в газе-проводнике предусматривается атомистической гипотезой.

Образовавшиеся таким образом капли, видимые простым глазом (так как наблюдение их скорости дает их величину, а следовательно, и их число), являются колониями, которые подтверждают существование прерывности электрических зарядов, находящихся в газе, и позволяют из их числа вычислить заряд каждого из этих центров при помощи прямого измерения. Теория показывает, что этот заряд равен заряду одновалентного атома в электролизе. Вот мы и встали твердой ногой в новой области, — и согласующиеся между собой факты появляются со всех сторон.

Кроме того, катодные лучи дают те же явления, и они также образованы центрами, несущими тот же заряд, но их механическая масса в 2000 раз меньше массы атома водорода. Их присутствие в любой материи, постоянство их свойств делают эти катодные корпускулы составными частями, по меньшей мере, для одной части материальных атомов, делают их элементами, исходя от которых строится атомное здание. Их периодические

движения порождают световые волны, а громадное число объясняет сложность спектра простых тел.

Эта концепция электрического атома, исходя из которого построены материальные атомы и который позволяет войти в неизвестную область их сложной структуры, образует необходимое связующее звено между материей и окружающей ее средой эфира, звено, которое сделает возможным полное развертывание атомистической гипотезы.

Действительно, после работ Максвелла и Герца электромагнитный и световой эфир можно, повидимому, считать исчерпывающе познанным, если рассматривать в качестве фундаментальных две величины: электрическое и магнитное поля, которые определяют состояние среды в данной точке. Шесть уравнений Герца связывают одновременные изменения этих двух величин с такой точностью, которая, повидимому, превышает все, что может дать опыт. Они приводят, например, к такой скорости распространения в эфире, лишенном обычной материи, которая абсолютно независима от формы и от периода распространяемых возмущений. Это отсутствие всякой дисперсии, повидимому, с исключительной точностью подтверждается отсутствием всякого изменения окраски у двойных звезд при каждом появлении или исчезновении одной из составляющих.

Понятие «атома электричества», брошенное, подобно плодоносному зерну, в хорошо подготовленную почву, позволяет реализовать наиболее величественный синтез из всех полученных до сих пор, синтез, который, мне кажется, призван в ближайшем будущем в корне изменить всю систему преподавания учения об электричестве, а также, вероятно, и механики, становящейся простым следствием вышеизложенных концепций.

Таким образом, это приводит, в конце концов, к теории Лоренца, против которой было найдено возражение только в механическом принципе равенства действия и противодействия, причем, как я полагаю, это — новый пример необоснованного распространения некоторого принципа на тот случай, который лежит вне опытов, послуживших базой для индукции принципа.

Теория Лоренца приводит к заключению, что излучающее асимметричным образом тело, удаленное от всякой другой материи, не удовлетворяет закону движения центра тяжести: этот закон никогда не устанавливался для случаев подобного рода, и здесь он находится в противоречии с самим опытом. По этому поводу я слышал, как на одном конгрессе почтенный ученый с трогательным убеждением выразил надежду, что он до своей смерти не испытает чувства огорчения, увидя исчезающим этот прекрасный принцип движения центра тяжести.

Мне кажется, что относительно этих новых идей я высказался вполне достаточно, чтобы показать, какой могущественный аргу-

мент они дают в пользу введения в школьное обучение атомистического синтеза, который сейчас торжествует, несмотря на то, что его всячески поносили. Услуги, которые нам может оказать этот синтез, являются для него достаточным оправданием.

Противопоставляя атомистическому синтезу синтез механический, я хотел показать, насколько необходимо было четко выделить характер последнего, а также ограничить область, где он является всемогущим, и избежать превращения его в центр обучения, в основу всякого научного объяснения.

Таким образом, после того как я изложил факты и законы, — следуя, насколько возможно, экспериментальному и индуктивному методу, согласно советам А. Пуанкаре, — я полагаю, что все их без колебаний можно объединить в действенном и живом синтезе, выдвигая прежде всего общие принципы, освобожденные от всякой частной конструкции и превосходящие всякую механику. Затем, все больше и больше углубляясь, но оставляя за каждым из синтезов его место и объединяя их только в области кинетической, можно будет излагать оба синтеза — механический и атомистический, которые образуют, таким образом, единое целое, мне кажется, совершенно необходимое как для философа, так и для техника.

ФИЗИКА ЭЛЕКТРОНОВ *

Наиболее бросающейся в глаза особенностью всех современных работ по электричеству является, повидимому, исключительная плодотворность нового, достигнутого в результате экспериментальных фактов, понятия прерывной, корпускулярной структуры электрических зарядов.

Следствия этого проникают во все области старой физики: они абсолютно всемогущи в электромагнетизме, оптике, лучистой теплоте; они бросают новый свет на все области знания — до фундаментальных концепций ньютоновской механики включительно — и омолаживают старые атомистические идеи, переводя их из разряда гипотез в разряд принципов благодаря установленной законами электролиза тесной связи между атомными структурами материи ** и электричества.

Я не ставлю своей задачей исследовать здесь все поле приложения этих знаний; мне хотелось бы только указать, на каких солидных экспериментальных и теоретических основаниях покоится теперь понятие об электроне — основе новейшей физики, подчеркнуть те положения, которые, повидимому, требуют еще большего освещения, и показать, насколько необъятны возможности синтеза, вытекающего из этих положений, синтеза, основные очертания которого в настоящее время только намечаются.

В своей современной форме этот синтез представляет собой прекрасный инструмент для изысканий; благодаря ему возникают вопросы во всех областях знания.

I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЭФИР

1. Поля и заряды. Можно сказать, что в результате гениальных усилий Фарадея, Максвелла и Герца появилось точное знание свойств электромагнитного и светового эфира — как среды

* Доклад, представленный 22 сентября 1904 г. конгрессу в Сен-Луи. — *Прим. ред.*

** Здесь, как и в нижеследующем, под материей Ланжевен понимает ту ее форму, которая состоит из атомов, т. е. электронов, протонов, нейтронов и других аналогичных частиц. Обычно ее называют веществом. Противопоставляя «материи» эфир, электромагнитное поле, Ланжевен противопоставляет друг другу две формы материи, а не материю чему-то нематериальному. — *Прим. ред.*

однородной, свободной от обычной материи, состояние которой, если исключить явление тяготения, может быть вполне определено, когда нам известны в каждой данной точке направление и величина сил двух полей: электрического и магнитного.

Я настаиваю теперь на возможности постижения этих понятий, так же как и связанного с ними понятия электрического заряда, независимо от какой бы то ни было динамики; я хочу сказать, что достигнуть этого возможно при помощи соображений, ни в малейшей степени не требующих знания законов движения обычной материи *.

Оба поля имеют то свойство, что их дивергенция (расходимость) является абсолютно нулевой в любой точке эфира; иначе говоря, что потоки электрической и магнитной силы сквозь замкнутую поверхность, не заключающую в себе обычной материи, в точности равны нулю. В действительности только материя, в обычном смысле этого слова, является тем, что́ содержит и может поставлять электрические заряды, вокруг которых существует дивергенция электрического поля, изменяющаяся в зависимости от знаков зарядов. Даже в предельном случае, когда электрические заряды кажутся нам наиболее освобожденными от их материального носителя, например в катодных лучах, экспериментальные факты, показывающие зернистую структуру этих лучей, полную неразрушимость их зарядов, наконец, то обстоятельство, что именно благодаря своему заряду катодные корпускулы обладают основным свойством материи, инерцией, и подвержены ускорениям в электромагнитном поле — все эти факты не позволяют нам отличать, так сказать, свободные заряды от обычной наэлектризованной материи.

Более того, мы придем к представлению, что не только электрического заряда не может быть без материи, но что, повидимому, не может быть и материи без электричества: скопление наэлектризованных центров обоих знаков, аналогичных катодным корпускулам, обладает почти всеми свойствами материи именно благодаря одному тому, что центры наэлектризованы. Мы увидим, в каких пределах эта концепция может быть принята как достаточная и будет ли необходимо приписывать дополнительные свойства электрическому заряду центров, чтобы получить удовлетворительную картину материи. Напротив, сам по себе эфир никогда не содержит электричества.

Если опыт требует от нас допущения существования положительных и отрицательных электрических зарядов и отличающегося от нуля потока электрической силы, проходящего сквозь замкнутую поверхность, находящуюся целиком в эфире и содержащую наэлектризованную материю, то иначе обстоит дело в отно-

* То есть законов механики Ньютона. — *Прим. ред.*

шений магнитного поля. Опыт до сих пор ни разу не установил еще ни одного факта, когда бы замкнутое пространство, находящееся в эфире, было пронизано магнитным током, отличающимся от нуля. Лишь интересные явления, недавно замеченные Виллардом относительно влияния сильного магнитного поля на получение катодных лучей, повидимому, находят простое объяснение посредством гипотезы свободных магнитных зарядов; однако далеко еще не доказано, что эта гипотеза безусловно необходима.

2. Уравнения Герца. Находящиеся в эфире электрическое и магнитное поля связаны между собой таким образом, что одно из них может существовать без другого только при условии, если оно не изменяется; всякое изменение электрического поля вызывает появление магнитного поля: это — ток смещения Максвелла; и всякое изменение магнитного поля вызывает появление электрического поля: это — явление индукции, открытое Фарадеем.

Эти два отношения выражены уравнениями Герца *, которые полностью резюмируют наше знание электромагнитной среды и устанавливают, что всякое возмущение этой среды распространяется в ней со скоростью света; Герцу принадлежит честь экспериментального доказательства этого факта.

3. Энергия. Можно еще сказать, что эфир является местом нахождения двух различных форм энергии — электрической и магнитной, которые способны превращаться одна в другую при посредстве материи, т. е. при посредстве содержащихся в ней наэлектризованных центров. Только в самом эфире, а именно в передаваемом им излучении, электрическое и магнитное поля, перпендикулярные направлению распространения света, всегда представляют собой равные, в каждом элементе объема, количества энергии, без перехода энергии из одной формы в другую. Наоборот, в присутствии материи электрическая энергия может существовать отдельно, и только движения наэлектризованных центров позволяют ей превращаться в магнитную энергию, поэтому только материя может быть источником излучений.

К двум предыдущим формам нужно добавить еще энергию тяготения, которая, повидимому, соответствует третьему виду активности эфира и связь которой с двумя другими еще очень темна. Я настаиваю здесь еще и на том, что принцип эквивалентности различных форм энергии, так же как и явления, позволяющие их измерять, могут быть постигнуты независимо от какого бы то ни было понятия динамики, при помощи процессов, в которых используются только равновесные материальные системы.

* Эти уравнения даны Максвеллом; Герц и Хевисайд придали им только современную форму. В современной литературе они известны как уравнения Максвелла. — *Прим. ред.*

4. Теория Лоренца. Таким образом, поскольку эфир оказался совершенно известен с точки зрения электромагнитной и оптической, перед продолжателями Максвелла и Герца встала проблема отношения между эфиром и материей, материей инертной, являющейся источником и приемником излучений, которые передает эфир. Искомая связь была найдена в электроне или электрической корпускуле — наэлектризованном центре, подвижном по отношению к эфиру.

Основной идеей Лоренца было установить возможности представления об относительном смещении электрических зарядов, центров (дивергенции) поля по отношению к эфиру, рассматриваемому как неподвижный. Это смещение, между прочим, происходит без малейшего изменения величины зарядов, т. е. поверхность, перемещающаяся в эфире вместе с этими зарядами, пронизывается совершенно не изменяющимся электрическим потоком; это — основной принцип сохранения количества электричества, который, возможно, включит в себя и принцип сохранения количества материи, если не может существовать материя без электричества. Однако, по всей вероятности, одного электричества окажется недостаточно, чтобы сконструировать материю.

В настоящее время у нас нет никаких более точных сведений об относительных перемещениях электрических зарядов и эфира — наэлектризованных центров в неподвижной среде; у нас нет никакой осязательной и общепризнанной формы, при помощи которой мы могли бы это постигнуть. Все предпринимавшиеся до сих пор попытки получить об этом конкретное представление, т. е. представить себе структуру эфира, остались почти бесплодными. Возможно, что здесь имеется трудность, связанная с современной природой нашего ума, привыкшего в течение веков думать в образах обычной материи, в то время когда едва ли разумно искать возможности построения понятия о простой и единообразной среде, какой является эфир, исходя из среды сложной и многообразной, которую представляет собой обычная материя. Несколько ниже, при рассмотрении механической теории эфира, я вернусь к этому вопросу. Полагаю, что нам нужно привыкнуть думать в образах эфира, независимо от обычных материальных представлений.

Если исходить из того, что электрический заряд равномерно распределен в некотором объеме среды, то принцип сохранения, вместе с возможностью относительного смещения зарядов и эфира, обязывает нас изменить в этой части среды уравнения Герца, относящиеся к току смещения, путем добавления тока конвекции. Конвекционный ток представляет собой необходимое следствие существования тока смещения и приводит к появлению магнитного поля благодаря смещению электрических зарядов в среде.

Это следствие уравнений Герца в настоящее время получило полное экспериментальное подтверждение.

Более того, экспериментальные факты придают этим движущимся зарядам прерывную зернистую структуру, что приводит к понятию электрона как особенной области эфира, несущего заряд определенного знака, распределенный по поверхности или по всему объему, в зависимости от того, наблюдается или нет прерывность напряжения электрического поля при переходе через поверхность, ограничивающую объем, занятый электроном. Инерция электромагнитного происхождения, которую мы должны признать в такой области, не соответствует гипотезе конечного электрического заряда, сконденсированного в точке, не имеющей размеров, так как тогда пришлось бы инерцию считать бесконечной.

Очень разнородные соображения, становящиеся все более и более точными, концентрируются вокруг понятия атомной структуры зарядов исходной точки всех современных работ по электричеству.

II. АТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

1. Электрон. Столь замечательные законы электролиза, открытые Фарадеем, устанавливают тесную и необходимую связь между атомной структурой материи и атомной структурой электричества. Эти законы оказались достаточными для того, чтобы привести Гельмгольца к выводу о том, будто электричество состоит из отдельных неделимых порций, элементов заряда, совершенно одинаковых с точки зрения количества электричества, которое они несут, и различающихся исключительно по знаку. Этот элементарный заряд равен тому, который переносит моновалентный атом или радикал в электролизе; поливалентный атом или радикал несут целое число подобных элементарных зарядов.

Джонстон Стоней был первым, кто употребил слово «электроны» для обозначения «атомов» электричества, которые сначала считались отличными от материи, хотя уже и тогда было известно, что они могли с ней соединяться, образуя электрические ионы. Присутствие подобных электронов, соединенных с материальными атомами, позволило ему объяснить отдельные особенности линейных спектров, в частности существование двойных линий с одинаковыми интервалами частот, причем движущийся электрон рассматривался им как источник световых волн.

2. Газы-проводники. Исследования электропроводности газов привели к необходимости признания понятия об атомах электричества. Они сделали это понятие более осязательным; благодаря им стало возможно сосчитать наэлектризованные центры,

замечать их каждый в отдельности и впервые измерить их заряд по абсолютному его значению.

В 1882 г. Гизе, — наблюдая особенности электропроводности газов в пламени, т. е. отклонения от закона Ома, в частности невозможность извлечь из газа (вне зависимости от силы употребленного электрического поля) больше определенного количества электричества, наблюдая прогрессирующую рекомбинацию зарядов газа, — высказал совершенно определенно ту идею, что как в электролитах, так и в газах электрические подвижные заряды переносятся некоторыми имеющимися в ограниченном количестве положительными и отрицательными материальными частицами, которые могут передвигаться в противоположных направлениях под влиянием извне создаваемого электрического поля, в результате чего уничтожается разность потенциалов, которая создала данное электрическое поле.

Действительно, трудно понять, каким образом (при предположении в пространстве непрерывного распределения зарядов обоих знаков, находящихся в газе) электрически нейтральная масса газа могла бы дать ограниченное количество электричества каждого знака, притом постепенно уменьшающееся в силу прогрессирующей рекомбинации, если в газ своевременно не вводится электрическое поле.

Для двух электричеств необходимо поэтому допустить прерывную структуру, позволяющую им существовать совместно без того, чтобы нейтрализовать себя полностью. Прогрессирующее обратное воссоединение заряженных частиц или ионов обоих знаков, имеющихся в ограниченном количестве, будет происходить в моменты их взаимного столкновения.

Явление тока насыщения (ограниченного количества электричества, которое можно получить из газа) оказалось в более благоприятных условиях для точного экспериментального исследования, когда сразу же после открытия лучей Рентгена и близких к ним излучений была открыта способность этих излучений делать проводящими газы, через которые они проникают. Ограниченные размеры зарядов, которые можно извлечь из таким образом измененных газов, конечная, легко измеряемая скорость, с которой эти заряды перемещаются под влиянием электрического поля, их прогрессирующая рекомбинация — все это прекрасно объясняется гипотезой о том, что излучение, так же как и высокая температура пламени, разлагает известное количество газовых молекул на части, несущие противоположные по знакам электрические заряды.

3. Явления конденсации. Известно, что явления конденсации пересыщенных водяных паров в газах, сделавшихся проводниками (что Роберт Гельмгольц объяснил присутствием ионов), блестяще подтвердили собой указанные выше гипотезы. Благодаря

работам Дж. Дж. Томсона, Таунсенда, К. Т. Р. Вильсона и Г. А. Вильсона видимые капельки воды, образованные конденсацией вокруг наэлектризованного центра, дают осязательное свидетельство существования этих наэлектризованных центров, а также средство измерить заряд, находящийся в каждой капле воды, равный примерно $3{,}4 \cdot 10^{-10}$ электростатистических единиц CGS, согласно последним измерениям Дж. Дж. Томсона и Г. А. Вильсона.

Основная идея такого рода измерений, примененная впервые Таунсендом к заряженным капелькам, образующимся в присутствии паров воды, насыщающих только что приготовленные газы, состоит в определении массы каждой капельки из ее скорости падения под влиянием одного только собственного веса. Формула Стокса, определяющая сопротивление сферического тела, находящегося в движении в вязкой среде, связывает скорость падения с радиусом капельки, а следовательно, и с ее массой. Из этого можно вычислить электрические заряды, несомые каждой капелькой, если известно отношение заряда к массе. Данное соотношение можно получить — как это сделали Таунсенд и Дж. Дж. Томсон, — измеряя или вычисляя общую массу воды всех капелек (предполагается, что они одинаковы), а также и общее количество электричества, несомое ионами, послужившими центрами, вокруг которых образовались эти капельки. Полученный таким образом заряд каждого центра равнялся $3 \cdot 10^{-10}$ единиц CGS, как это было определено Таунсендом для газов, полученных электролизом; при определении же проф. Томсоном этого заряда в первой серии измерений с газами, ионизованными лучами Рентгена, его значение оказалось $6{,}5 \cdot 10^{-10}$.

Г. А. Вильсон получил отношение заряда к массе одной капельки более простым способом: он сравнивал скорость падения этой капельки под влиянием одной силы тяжести со скоростью падения в вертикальном электрическом поле; этим путем искомое соотношение получается непосредственно *. Преимущество этого приема несомненно, ибо он с очевидностью показывает, что электрические заряды находятся на капельках и что имеется возможность выделить капельки, несущие двойной или тройной заряд. В качестве среднего результата своих измерений Вильсон дает число $3{,}1 \cdot 10^{-10}$, очень близкое к результатам Таунсенда. Вторая серия опытов проф. Дж. Дж. Томсона состояла в том, что в качестве источников ионизации он использовал радиоактивные тела, более постоянные, чем трубка Крукса; кроме того, для образования капелек он пытался использовать все наличные в газе

* Наиболее точные измерения с помощью этого метода были произведены несколько лет спустя *Милликеном*. — *Прим. ред.*

ионы, производя пересыщение воздуха парами воды путем быстрого (насколько это возможно) и достаточно большого процесса расширения, чтобы произвести конденсацию как на положительных, так и на отрицательных ионах. В этой серии опытов Томсон получил в качестве среднего результата число $3{,}4 \cdot 10^{-10}$, что полностью соответствует результатам, полученным другими экспериментаторами.

Принципы термодинамики точно устанавливают влияние наэлектризованного центра на конденсацию паров воды, так как электрический заряд капельки уменьшает давление пара, находящегося в равновесии с нею. Более того, минимальное пересыщение, необходимое, как это установил К. Т. Р. Вильсон, для образования капелек воды на ионах, оказалось одинаковым и независимым от происхождения ионов — лучи Рентгена, Беккереля, разряд с острия, действие ультрафиолетового света на отрицательно заряженный металл и т. д. Все это позволяет, при помощи чисто термодинамических соображений, вычислить величину заряда, несомого каждым из ионов. Это вычисление, совершенно отличное от прямого измерения, приводит к числу $5 \cdot 10^{-10}$ CGS.

4. Интегральное излучение. Еще более поражающим является результат, недавно полученный Г. А. Лоренцем. При помощи экспериментального исследования интегрального излучения ему удалось осуществить точное измерение элементарного заряда, несомого наэлектризованными центрами, находящимися в металлах. Ниже мы увидим, что поглощение и испускание тепловых и световых волн материей связаны с присутствием в этой материи движущихся электронов. При излучении данной длины волны соотношение между испускательной и поглощательной способностью не зависит от природы вещества и представляет собой полную лучеиспускательную способность излучателя, которую болометрические измерения определяют непосредственно. Кроме того, это соотношение может быть исчислено, как показал Лоренц, для волн, длина которых достаточно велика по отношению к среднему пути пробега электронов, как функция заряда, несомого каждым из них. Сравнение этого результата с измерениями Курлбаума дало совершенно новый способ определения заряда; его величина оказалась порядка $3{,}7 \cdot 10^{-10}$ единиц CGS.

5. Кинетическая теория. Приведем, наконец, последнее подтверждение, которое уточняет наши знания об атоме электричества и усиливает нашу уверенность в этой фундаментальной концепции. Опираясь на кинетическую теорию, Таунсенд при помощи простых рассуждений сравнил подвижность газовых ионов с их коэфициентом диффузии внутри этого газа и, экспериментально измерив эти величины, доказал тождественность заряда

каждого из газовых ионов и атома электричества Гельмгольца, т. е. заряда атома водорода при электролизе.

Это дает новое подтверждение цифровых значений, полученных для элементарного заряда, так как благодаря выводу Таунсенда можно узнать заряд одновалентного атома при электролизе и отсюда непосредственно вывести постоянную Авогадро, т. е. число молекул, содержащихся в данном объеме газа. Результат полностью совпадает с предварительными оценками, в общем значительно более грубыми, которые можно было вывести из кинетической теории газов.

Таким образом, получается ряд совпадающих указаний, выведенных из абсолютно различных источников, которые устраняют всякое сомнение в зернистой структуре электрических зарядов и, как следствие, в атомной структуре самой материи. Измерения, о которых я только что напомнил, позволяют нам с полной уверенностью стоять на почве (правда, до сих пор довольно зыбкой) молекулярных величин.

Я особенно подчеркиваю здесь чрезвычайно примечательный результат, безусловно зависящий от какого-то основного свойства эфира, что все наэлектризованные центры тождественны с точки зрения величины носимого ими заряда. Мы должны еще глубже проникнуть в их свойства, в их взаимоотношение с материальными атомами, определить их относительную величину по сравнению с атомами материи; без этого невозможно притти к наиболее точному понятию, которым мы, несомненно, можем теперь обладать в этой области науки, а именно — к понятию отрицательных электронов или катодных частиц, совершенно тождественных не только с точки зрения их заряда, но также и с точки зрения их динамических свойств. К сожалению, о положительных центрах мы знаем значительно меньше.

III. ИНЕРЦИЯ И ИЗЛУЧЕНИЕ

1. Электромагнитный след в эфире. Прежде чем итти дальше, необходимо остановиться на том, что можно извлечь из той точки зрения, к которой мы, наконец, подошли, а именно: из представления о наэлектризованных центрах, существование которых установлено опытным путем и заряд которых мы знаем в абсолютном измерении — центрах, подвижных по отношению к неподвижному эфиру, определяемому уравнениями Герца; и все это можно сделать, не прибегая к каким-либо динамическим соображениям.

В какой мере могут быть выведены известные нам свойства материи из этих двух понятий электрона и эфира и что мы должны допустить сверх этих понятий, чтобы построить синтез? Мы увидим ниже, при уточнении нашей концепции электрона,

как можно будет благодаря этой концепции представить одновременно инерцию материи, ее динамические свойства и ее способность испускать и поглощать электромагнитные излучения, передаваемые эфиром. Возможность постижения инерции массы не как основного понятия, но как следствия законов электромагнетизма дает нам концепция, получившая свое начало в важных мемуарах, опубликованных в 1881 г. Дж. Дж. Томсоном. В них он, опираясь на существование тока смещения Максвелла, изучает электромагнитное поле, сопровождающее движущуюся наэлектризованную сферу.

Это движение влечет за собой изменение электрического поля в неподвижной по отношению к среде точке, а следовательно, обусловливает собой возникновение тока смещения и, как следствие, появление магнитного поля, в соответствии с идеями Максвелла. Как я уже указывал, последнее представляет собой необходимое следствие наличия тока конвекции. Полученное таким путем магнитное поле, аналогичное полю, образованному элементом тока, параллельного скорости движущегося наэлектризованного тела, пропорционально (в каждой точке) этой скорости, поскольку она не слишком приближается к скорости света.

Появление магнитного поля в момент начала движения тела вызывает соответствующий расход энергии, пропорциональной (в первом приближении и для малых скоростей по сравнению со скоростью света) квадрату скорости, т. е. вполне подобной обычной кинетической энергии. Таким образом, по крайней мере одна часть инерции наэлектризованного тела является следствием его электрического заряда.

Более того, образованные таким путем магнитное поле и электрическое поле (последнее изменяется магнитным тем сильнее, чем больше скорость приближается к скорости света) создают вокруг поступательно движущегося наэлектризованного центра след, сопровождающий этот центр в его движении через эфир и остающийся неизменным до тех пор, пока не меняется скорость. Таким образом, для того чтобы изменить энергию этого следа, а следовательно, и увеличить или уменьшить скорость, необходимо внешнее воздействие. При отсутствии всякой другой инерции, кроме электромагнитной, обусловленной появлением данного следа, это обстоятельство соответствует основному закону Галилея о сохранении приобретенной скорости при условии отсутствия какого бы то ни было внешнего действия или какого бы то ни было внешнего силового поля.

В данном случае неподвижный эфир или электромагнитная среда служит твердой основой для осей координат, к которым вполне приложим принцип инерции и в отношении которых обычная механика ограничивается утверждением их существования в следующих словах: существует система осей, определен-

ная, по крайней мере, для равномерного прямолинейного движения, относительно которой принцип Галилея в точности оправдывается.

2. Абсолютное движение. Хотя, с современной точки зрения, мы и можем рассматривать эфир как несущий оси Галилея, однако из этого отнюдь еще не следует, что электромагнитные явления позволяют нам достигнуть абсолютного движения. Наоборот, нам кажется, что статические опыты, производимые в материальной системе наблюдателем, передвигающимся вместе с этой системой, не дают возможности — какова бы ни была точность электромагнитных или оптических измерений — обнаружить это движение, увлекающее систему по отношению к эфиру, если это движение прямолинейно. Лармор и более подробно Лоренц доказали, что если в движущейся системе существуют только действия, возникшие в результате электромагнитных явлений, то вполне возможно установить точное статическое соответствие (относящееся к положениям равновесия или к черным полосам интерференции в оптике) между системой, находящейся в движении, и системой, неподвижной относительно эфира. Это может быть достигнуто при помощи преобразования переменных, которое в электромагнитных уравнениях сохраняет по отношению к движущимся осям такую же форму, какой они обладают по отношению к неподвижной системе осей. Различие этих систем состоит в том, что подвижная из них слегка сплющена по отношению к неподвижной — в направлении движения — на величину, пропорциональную квадрату отношения скорости движения к скорости света. Это сплющивание в равной мере влияет на все элементы движущейся системы — даже на электроны, если только внутренние воздействия являются исключительно электромагнитными или же ведут себя как таковые и если наблюдатель не может установить это сплющивание, так же как и скорость увлекающего его движения. Так объясняются многочисленные, давшие отрицательный результат, опыты в этом направлении Майкельсона и Морли, Рэлея, Брейса, Трутона и Нобля, если допустить, что все внутренние действия в материи — электромагнитного происхождения. Возможно, что опыты другого типа, чем те, которые пытались производить до сих пор, опыты динамические, а не статические, позволят, наконец, установить абсолютное движение, уловить оси, связанные с эфиром, вместо того чтобы просто предполагать их существование.

Как мы ниже покажем, устранить посторонние, не электромагнитные воздействия, повидимому, трудно. Следовательно, необходимо допустить, вместе с Лоренцем, следующее предположение: соответствие может сохраняться при условии, если в передвигаемой системе силы и массы не электромагнитного проис-

хождеиия изменяются совершенно так же, как силы и массы электромагиитиые. При современном состояиии вопроса эта гипотеза слишком сложна и прибегать к ней нет необходимости *. Вполне вероятно, что эти посторонние влияния, обеспечивающие устойчивость электрона и представляющие связанную с ним силу тяготения, ие сказываются в заметной степени в приведенных выше опытах, и все в иих происходит так, как если бы существовали только электромагнитные силы, которые одни лишь играют в иих роль.

3. Электромагнитная инерция. После Томсона проблема электромагнитного следа, сопровождающего наэлектризованную сферу или эллипсоид, которые равномерно и прямолинейно движутся через эфир, была полностью разрешена Хевисайдом и Сирлом; а Макс Абрагам показал, что их результаты полностью сохраняют свое значение — с измеиением одного лишь числениого множителя — и для случая, когда, вместо того чтобы предполагать тело проводииком, предполагают, что заряд равномерно распределен по всему объему.

Из всех иаиболее важиых результатов, содержащихся в этом решении проблемы Дж. Дж. Томсоиа, я укажу на следующее: если сфера является проводииком, то электрический заряд остается равиомерно распределенным иа поверхности, какова бы ни была скорость движения сферы, в то время как электрическое поле, находящееся на расстоянии, имеет теидеицию все более и более концентрироваться в экваториальной плоскости по мере того, как скорость сферы приближается к скорости света; более того, энергия, которую иеобходимо затратить в иачале движения, чтобы изменить электромагнитное поле, окружающее сферу в ее следе, перестает быть пропорциональной квадрату скорости сферы и иеограничеино увеличивается, когда эта скорость приближается к скорости световых волн. Закон возрастания киuетической энергии электромагнитного происхождения, энергии самоиндукции тока, которому эквивалентна движущаяся заряженная частичка, легко выводится из формулы Сирля.

Не прибегая к какой-либо другой гипотезе, кроме гипотезы об электрическом заряде, можно предположить, что электрон обладает инерцией, которую можно определить как емкость кинетической эиергии с своеобразным законом изменения этой емкости как функции скорости, — закоиом, выражение которого мало зависит от гипотез о форме электрона и о распределении электрического заряда.

Во всех случаях мы встречаемся с иевозможиостью сообщить электрону скорость, равную скорости света, по крайней мере на

* Это предположение подтвердилось с появлением теории относительности. — *Прим. ред.*

длительное время *. Вместо того чтобы электрон считать сферическим при любой скорости, Лоренц допускает, что он является таковым лишь в состоянии покоя с равномерным распределением заряда. Если, однако, внутренние процессы в электроне только электромагнитного происхождения, то это значит, что он должен сплющиться по направлению своего движения на величину, пропорциональную квадрату $\left(\frac{v^2}{c^2}\right)$ отношения скорости своего прямолинейного перемещения к скорости света; электрон становится эллипсоидом вращения, несколько сплющенным, причем экваториальный диаметр остается равным диаметру начальной сферы. Это приводит к выражению электромагнитной инерции, отличающемуся от выражения инерции для неизменной сферы. Мы увидим ниже, что, повидимому, нет необходимости предполагать у электронов (во всяком случае, у электронов с отрицательным зарядом) какую-либо другую инерцию, кроме указанной, пока опыты не будут достаточно точными, чтобы позволить установить самую форму электрона, от которой зависит закон изменения кинетической энергии в зависимости от скорости.

4. Две проблемы. До сих пор мы рассматривали случай одного равномерно движущегося электрона, при отсутствии какого бы то ни было внешнего электромагнитного поля, способного изменить движение электрона, сообщая ему ускорение. Общая проблема взаимной связи между эфиром и электроном, которая представляет собой, по всей видимости, наиболее существенное из взаимной связи между эфиром и материей, фактически является двойной проблемой: во-первых, выяснить, какова электромагнитная пертурбация, сопровождающая в эфире любое данное перемещение электронов; во-вторых, показать, какие движения будут иметь электроны во внешнем электромагнитном поле, наложенном на то поле, которое образует их электромагнитный след.

5. Волна скорости и волна ускорения. Мы обладаем всеми необходимыми элементами, чтобы разрешить первую проблему, в которой равномерное движение является только частным случаем. Лоренц дал в очень простой форме общее решение — при помощи так называемых запаздывающих потенциалов. Каждый элемент заряда при данном движении определяет своим положением свою скорость и свое ускорение в момент t, а кроме того,

* Подчеркнем, что здесь имеется в виду скорость света в области пространства, не занятой обычным веществом, где она достигает значения 300 000 *км/сек*. В телах обычных скорость света меньше этого значения, и здесь электроны могут двигаться быстрее света, но не быстрее вышеуказанной скорости. Таким сверхбыстрым движением электронов в веществе обусловлено особое оптическое явление, открытое советскими физиками С. И. Вавиловым и П. Л. Черенковым. — *Прим. ред.*

электрическое и магнитное поля в момент $t+\tau$ на сфере, центром которой является положение в момент t, а радиусом — путь, который проходит свет в течение времени τ. Лоренц дал выражения для обоих потенциалов — электростатического и векторного, поля которых вычисляются согласно известным формулам.

Полные выражения этих полей, впервые сформулированные Льенаром, состоят каждое из двух частей. Первая часть зависит исключительно от скорости элемента заряда в момент t и связана с образованием электромагнитного следа, сопровождающего электрон при его перемещении; я буду называть это *волной скорости*. Эта волна скорости, существующая только в случае равномерного движения заряда, имеет свое электрическое поле, направленное в сторону положения, которое элемент заряда занял бы в момент $t+\tau$, если бы он сохранил ту же скорость, какую он имел в момент t. Шварцшильд называет это положение точкой аберрации; она совпадает с истинным положением движущегося заряда в момент $t+\tau$, если движение равномерно. Другая часть обоих полей связана с ускорением, и направления их здесь перпендикулярны друг к другу и к лучу, в то время как сами поля (электрическое и магнитное) обладают равными энергиями. В этом случае имеются все характерные черты излучения, свободно распространяющегося в эфире; я буду называть это *волной ускорения*. Более того, поскольку напряжения полей меняются здесь обратно пропорционально расстоянию от центра, то энергия, представленная этой волной ускорения, не стремится к нулю, когда время τ увеличивается неограниченно. Следовательно, здесь мы имеем энергию, излучаемую волной ускорения в бесконечность.

Наоборот, волна скорости, в которой интенсивность полей изменяется в обратном отношении квадрату радиуса $c\tau$, не переносит в бесконечность никакой энергии; энергия волн скорости сопровождает электрон в его перемещении, т. е. содержит его кинетическую энергию.

6. Излучение требует ускорения. Из этого делается вывод, что наэлектризованный центр, получив ускорение — и только в этом случае, — испускает в бесконечность (в виде поперечной волны, т. е. электромагнитного излучения) определенное количество энергии, пропорциональное в единицу времени квадрату ускорения.

Происхождение электромагнитного и всякого другого излучения нужно искать, следовательно, в электроне, получившем ускорение: при его посредстве материя функционирует в качестве источника герцевых или световых волн. Всякое ускорение, всякое изменение, происходящее в состоянии движения системы электронов, превращается в испускание.

Характер излученной волны, естественно, изменяется в зависимости от того, каково ускорение — внезапное, прерывное или периодическое. В первом случае, реализуемом, например, при внезапном торможении антикатодом электронов или отрицательных корпускул, из которых состоят катодные лучи, излучение представляет собой внезапную пульсацию, протяженность которой равняется произведению скорости света на время замедления и которая дает представление о лучах Рентгена или γ-лучах радиоактивных тел. Наоборот, если ускорение периодично, как в случае электрона, обращающегося вокруг наэлектризованного центра со знаком, противоположным знаку электрона, то испускаемое излучение представляет собой свет с длиной волны, определяемой периодом обращения электрона. Решение первой из двух основных проблем является, повидимому, полным и не представляет никаких затруднений *.

IV. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОНОВ

1. Идея Максвелла. Другая проблема, более сложная, состоит в том, чтобы найти движение, а также ускорение, получаемое движущимся электроном в электрическом и магнитном полях данного напряжения, это, собственно говоря, проблема динамики электронов. Уравнения, которые разрешают эту проблему, должны, как и уравнения обычной динамики, содержать два типа членов: одни, зависящие от внешних полей и представляющие их действие на электрон, аналогичны внешним силам в динамике; другие, зависящие от самого движущегося тела и представляющие его сопротивление сообщению движения, аналогичны силам инерции.

Члены, соответствующие внешним действиям, силам, получены Лоренцем посредством метода, представлявшего собой естественное продолжение идей Максвелла о возможности дать механическое объяснение (впрочем, неопределенное) фактов электромагнетизма. Аналогия между уравнениями электродинамической индукции и уравнениями Лагранжа, повидимому, оправдывала такое объяснение; следовательно, систему эфир — электроны можно было рассматривать как механическую систе-

* В настоящее время это решение нельзя считать полным: оно не учитывает прерывной, квантовой природы излучения, твердо теперь установленной. Указанное Ланжевеном решение второй проблемы не может быть согласовано с фактом устойчивости атомной системы; вследствие ускорений, постоянно испытываемых электроном в атоме, энергия последнего должна была бы очень быстро рассеяться в виде излучения, чего на самом деле не происходит.

Весь комплекс возникающих здесь вопросов, несмотря на огромные успехи, достигнутые современной квантовой механикой и квантовой теорией излучения не может считаться удовлетворительно решенным и в настоящее время. — *Прим. ред.*

му и к движению наэлектризованных центров применять уравнения Лагранжа, выводя, таким образом, силы, действующие на электроны, из электрической и магнитной энергий, которые можно рассматривать как соответствующие потенциальной и кинетической энергии в механической системе, заменяющей эфир.

Таким образом, если признать понятия массы и силы, то к среде эфира необходимо будет применить уравнения материальной динамики, которые выведены из принципов, основанных на наблюдении одной только обычной материи, взятой при этом в большом количестве и без заметного воздействия излучений.

2. Эфир и материя. Таким образом, указанный нами довольно смелый вывод позволяет распространить эти принципы на область, для которой они не предназначались, и, как следствие, допустить также возможность материального объяснения эфира *. Кроме указанных нами трудностей, подобная попытка влечет за собой и ряд новых, весьма значительных, и все усилия, направленные на получение более точных результатов, не достигли цели и до сих пор. Наиболее глубокой попыткой в этом направлении была теория гиростатического эфира Кельвина. Гиростатический эфир вполне пригоден для того, чтобы представить распространение периодических явлений в эфире, но он делает невозможным существование постоянной деформации, которая, однако, необходима, чтобы объяснить постоянное электростатическое поле.

Гиростаты в таком случае возвращались бы в конце определенного конечного промежутка времени к исходному положению, и система перестала бы реагировать на вызванную в ней деформацию. Более того, если эту концепцию принять, тогда невозможно будет объяснить присутствие в эфире перманентных электронов, центров деформации среды.

Кроме того, Лармор вынужден был в материальном изображении, предложенном им для эфира, приписать гиростатической системе Кельвина свойства *совершенной жидкости,* перемещение которой, представляющее собой магнитное поле, в каждый данный момент было бы невихревым и, следовательно, не могло бы порождать электрического поля вращением гиростатов, находящихся в среде. Есть еще одна большая трудность: если для бесконечно малых смещений движение жидкости в каждый данный момент удовлетворяет условию быть невихревым, то для конечных смещений оно не может быть таковым, и, следовательно, магнитное поле не могло бы существовать в течение конечного времени, не порождая при этом электрического поля.

* Здесь и далее во многих местах Ланжевен использует неудачную терминологию, употребляя понятие «материальный» в смысле: «состоящий из частей, к которым приложимы понятия и законы ньютоновской механики». — *Прим. ред.*

Я полагаю, что невозможно преодолеть эти затруднения и притти к материальному изображению эфира, природа и свойства которого являются совершенно отличными и, повидимому, значительно более простыми и единообразными, чем природа и свойства обычной материи.

3. Действие и противодействие. Продолжая наши рассуждения в том же направлении, мы встретимся с новыми трудностями.

Применив уравнения Лагранжа, Лоренц получил для каждого движущегося электрона две внешние силы, два члена, выражающих воздействие электромагнитного поля.

Одна сила параллельна электростатическому полю: это — обычная электрическая сила; вторая сила перпендикулярна к направлению скорости и магнитного поля: это — электромагнитная сила, аналогичная силе Лапласа, т. е. сила, с которой магнитное поле действует на элемент тока. Этот двойной результат резюмирует все элементарные законы электромагнетизма и электродинамики, если рассматривать ток в обычных проводниках как перемещение наэлектризованных частиц.

Легко установить, что полученные таким путем силы, представляющие собой воздействие эфира на электроны, т. е. на материю, которая их содержит, не удовлетворяют принципу: действие равно противодействию, если взять весь комплекс сил, действующий в данный момент на все электроны, составляющие материю *. Например, в случае с телом, излучающим асимметрически, получается отдача, т. е. ускорение, которое не компенсируется в тот же момент никаким иным ускорением, которому подвергается другая часть материи. Позднее, в момент, когда испущенное излучение встречает препятствия, эта компенсация происходит (но только частично, если поглощается не все излучение) при посредстве давления, которое оказывает излучение на воспринимающее его тело и существование которого доказано опытом. То, что действие равно противодействию, экспериментально в отношении подобных случаев никогда, впрочем, не было доказано, и в этом нет ничего страшного, если не распространять данный принцип за пределы тех фактов, которые его вызвали.

4. Количество электромагнитного движения. И если тем не менее это несколько произвольное распространение принципа ** захочется кому-либо реализовать, то необходимо будет приме-

* Однако этот принцип строго соблюдается, если учесть количество дви- ходит прямое подтверждение в современной физике. Первым непосредствен-

** Это не «произвольное», а совершенно необходимое распространение принципа сохранения количества движения на электромагнитное поле находит прямое подтверждение в современной физике. Первым непосредственным подтверждением был знаменитый опыт П. Н. Лебедева по измерению светового давления. — *Прим. ред.*

нять его не только к материи; необходимо также приписать и эфиру количество движения, представляющее собой количество движения материальной системы, с которой его сравнивают. Пуанкаре показал, что это количество электромагнитного движения по величине и направлению должно быть пропорционально вектору Пойнтинга, позволяющему в то же время определить энергию, переданную через известную среду.

Исходя из этого понятия о количестве электромагнитного движения, Макс Абрагам смог вычислить неучтенные Лоренцем члены, которые зависят от движения самого электрона, от силы его инерции, возникающей вследствие изменения количества электромагнитного движения, содержащегося в сопровождающем электрон электромагнитном следе. Таким образом, он впервые пришел — в соответствии с формой членов, определяющих эту силу инерции, — к понятию об асимметричной массе, являющейся функцией скорости.

5. Квазистационарное движение. Вычисление может быть целиком выполнено только в том случае (который, впрочем, всегда реализуется на опыте), если ускорение электрона достаточно мало для того, чтобы в каждый данный момент можно было бы рассматривать сопровождающий его электромагнитный след как идентичный тому следу, который сопровождал бы электрон, движущийся с той же скоростью, но равномерно, в течение довольно продолжительного промежутка времени. Это — случай, который Абрагам называет квазистационарным движением. В этом случае электромагнитный след, сопровождающий электрон, известен в каждый данный момент, о чем мы уже указывали; стало быть, известно и количество электромагнитного движения, а следовательно, и его изменения, которыми измеряется сила инерции.

Условие квазистационарного движения сводится к тому, чтобы в непосредственной близости к электрону, там, где находится почти все количество электромагнитного движения, испускаемая волна ускорения была бы ничтожно малой по сравнению с волной скорости.

6. Масса продольная и масса поперечная. В этих условиях находят, что сила инерции пропорциональна ускорению с коэфициентом пропорциональности, аналогичным массе, но являющимся здесь функцией скорости, и, подобно кинетической энергии, безгранично увеличивается по мере приближения к скорости света. Более того, для одной и той же скорости электромагнитная масса не одинакова и зависит от того, каково ускорение — параллельно оно или перпендикулярно направлению скорости. Следовательно, по отношению к направлению движения имеется масса продольная и масса поперечная. Таким образом, масса перестает быть скалярной величиной, но она обладает симметрией

тензора, параллельного скорости. Ни один экспериментальный факт пока еще не позволяет установить эту асимметрию массы электронов; четко она может проявиться только при скоростях, близких к скорости света. Однако изменение поперечной массы в зависимости от скорости было установлено Кауфманом на β-лучах радия, состоящих из частичек, тождественных катодным корпускулам. Достаточно сравнить отклонения этих лучей в электрическом и магнитном полях, перпендикулярных к направлению их движения, чтобы, применяя уравнения, полученные ранее для динамики электронов, определить их скорость и отношение электрического заряда к поперечной массе частиц, образующих данные лучи. Это отношение уменьшается с увеличением скорости, и мы, если за основу примем принцип сохранения электрического заряда, придем к выводу об экспериментальном увеличении поперечной массы в отношении, легко сравнимом с отношением, которое теория дает для одной электромагнитной массы.

7. Материя философов. Но прежде чем обсуждать результаты этого сравнения, я хочу указать на одно логическое затруднение, с которым мы сталкиваемся на нашем пути. В качестве основных понятий мы договорились рассматривать понятия массы и силы, установленные механикой для выражения законов движения материи. Мы априори считаем массу скалярной, абсолютно неизменной величиной.

Далее, предполагая возможность материального представления эфира, мы, применяя к нему уравнения динамики, вынуждены допустить для электронов, т. е. частиц материи, а следовательно, и для самой материи, существование асимметричной, тензорной и изменяемой масс. К чему же в таком случае должны применяться обычные уравнения динамики и понятия, рассматривавшиеся как основные, которые выражаются этими уравнениями? К абстрактной ли материи, материи философов, которая не является обычной материей, потому что последняя неотделима от электрических зарядов и, по всей вероятности, состоит из скопления электронов, находящихся в периодическом устойчивом движении в силу их взаимодействия, — или же к эфиру? Но мы не знаем, что в эфире является массой, а что — движением.

Повидимому, понятие «эфир» было бы правильнее рассматривать как основное; тогда его можно будет определить первоначально по известным нам свойствам, т. е. по электрическому и магнитному полям, рассматриваемым в качестве основных, которые можно понять, как мы уже сказали, не прибегая при этом к законам динамики, к понятию массы и силы в их обычной форме. Мы тогда обретем эти последние как понятия вторичные и производные.

V. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДИНАМИКА

1. Изменение точки зрения. Было бы гораздо естественнее обратить концепцию Максвелла и рассматривать указанную им аналогию между уравнениями электромагнетизма и уравнениями динамики в данной Лагранжем форме скорее как возможность электромагнитного представления принципов и понятий обычной материальной механики, чем как доказательство возможности обратного представления. Следовательно, нам нужно решить вторую проблему — проблему динамики электронов, их движения в данных полях, не прибегая при этом к принципам механики, а пользуясь только понятиями чисто электромагнитного характера.

Уравнения Герца, позволившие решить первую проблему, для второй уже недостаточны, и поэтому необходим более общий принцип, который бы не только изображал движение электронов, но и определял его.

2. Законы стационарной энергии. Этот принцип мы используем в данной Лармором форме, которую можно рассматривать как обобщение законов, найденных в электростатике и электродинамике. Известно, что распределение электрических зарядов и электрического поля в системе наэлектризованных тел всегда происходит таким образом, что электростатическая энергия W_e, содержащаяся в среде, измененной электрическим полем, должна быть минимальной. Аналогичные принципы относятся также к магнитному полю, образованному токами данной силы, причем энергия W_m, локализованная в магнитном поле, будет для реального распределения его наименьшей, чем для всякого другого распределения, удовлетворяющего условию, чтобы интеграл поля вдоль замкнутой линии равнялся произведению 4π на силы токов, проходящих через этот контур.

Когда смещения возможны, то проводники, удерживаемые при постоянном потенциале, находятся в устойчивом равновесии, если электростатическая энергия максимальна, и токи данной силы также находятся в устойчивом равновесии, если энергия их магнитного поля также максимальна. Во всех этих случаях максимума и минимума бесконечно малое отклонение системы от устойчивого состояния не производит никакого изменения в величине энергии. Энергия остается стационарной.

3. Общий принцип. Если состояние системы переменно и если, следовательно, в ней одновременно существуют оба вида полей, то мы стараемся найти, как и при постоянном режиме, некоторое выражение, остающееся стационарным, т. е. вариация которого равна нулю, — при предположении, что система бесконечно мало уклоняется от своего действительного состояния. А это значит, что энергии W_e и W_m, имеющие указанное

значение при постоянном режиме, необходимо заменить интегралом, взятым по времени. В данном интеграле фигурирует не сумма энергий (так как это количество, равное общей энергии, должно остаться неизменным при наличии только электромагнитных воздействий), а их разность:

$$\int_{t_0}^{t_1}(W_e - W_m)dt.$$

Интеграл остается стационарным для всякого возможного изменения системы, причем имеет место условие, что при пределах t_0 и t_1 интеграла изменения равны нулю, совершенно так же, как в аналогичном принципе Гамильтона в механике. Только что изложенный нами принцип нулевой вариации, который мы рассматриваем как результат индукции, базирующейся на принципах исключительно электромагнитного характера, в действительности позволяет снова найти три из уравнений Герца (при допущении трех других) и дает, наиболее простым способом, решение, которое мы получили для первой проблемы при помощи указанных уравнений. Больше того, движение электронов, предположенное заданным только в моменты t_0 и t_1, входит в интеграл, и условие, что интеграл является стационарным, позволяет определить законы этого движения в промежутке, исходя из принципа, имеющего чисто электромагнитное значение. Таким же образом получают и результаты Абрагама. Уравнения движения содержат члены, которые зависят: одни — от движущегося электрона; они пропорциональны — при допущении квазистационарного движения — ускорению электрона, с коэфициентами, являющимися функциями скорости, названными нами продольными и поперечными массами электрона; другие — от зарядов и внешних полей, называемых нами теми же силами, о которых говорит Лоренц. Последующее движение электрона определяется, таким образом, электромагнитным состоянием системы в данный момент.

4. Связи в электроне. Чтобы упростить анализ и не иметь дела с вращательным движением электрона, я буду рассматривать электрон как вакуоль, находящуюся в эфире. Объемные интегралы, представляющие энергии W_e и W_m электрического и магнитного полей, распространяются только по внешнему пространству от поверхности, ограничивающей вакуоль. Кроме данного электрического заряда, в качестве единственной связи можно предположить форму этой определенной поверхности, например сферической, обусловленной действием неизвестных сил. В этом случае, естественно, снова приходят к формулам Абрагама для продольной и поперечной масс (когда электрон сферический). Но можно также предположить эту связь и бо-

лее простой, установив, например, только определенный объем вакуоли, обусловленный несжимаемостью внешнего эфира. Если затем мы начнем отыскивать, какова же будет данная форма в случае равномерного поступательного движения, то найдем, что форма, которую электрон примет сам по себе, удовлетворяя тем самым условию нулевой вариации, окажется в точности эллипсоидальной, сплющенной формой, предположенной Лоренцем, с той разницей, что экваториальный диаметр будет увеличиваться по мере возрастания скорости вместо того, чтобы оставаться постоянным, как предполагал Лоренц, поскольку это постоянство влечет за собой уменьшение объема электрона по мере увеличения его скорости. Формулы, которые в данном случае выражают изменение продольных и поперечных масс в зависимости от скорости, отличаются от формул Абрагама и Лоренца, хотя они все же и показывают неограниченное возрастание обеих масс по мере приближения их скорости к скорости света.

Этим путем получаются формулы для отношения $\frac{m}{m_0}$, т. е. отношения поперечной массы m, являющейся ныне единственно опытно доступной, к массе m_0 (при очень малых скоростях) как функции $\beta=\frac{v}{c}$, т. е. отношения скорости электрона к скорости света. Формулы эти таковы:

1) *изменяющийся сферический электрон:*

$$\frac{m}{m_0}=\frac{3}{4}\psi(\beta)=\frac{3}{4\beta^2}\left[\frac{1+\beta^2}{2\beta}L\,\frac{1+\beta}{1-\beta}-1\right];$$

2) *изменяющийся электрон при постоянном экваториальном диаметре:*

$$\frac{m}{m_0}=(1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}};$$

и при постоянном объеме:

$$\frac{m}{m_0}=(1-\beta^2)^{-\frac{1}{3}}.$$

5. Сравнение. Опыты Кауфмана пока еще недостаточно точны для того, чтобы определить, какая из этих формул лучше представляет экспериментальное изменение отношения $\frac{e}{m}$ в зависимости от скорости. Чтобы произвести это сравнение, я применил прием, аналогичный приему Кауфмана. Последний определяет два поля — электрическое и магнитное, фигурирующие в выражениях скорости, и отношения $\frac{e}{m}$ как функции экспериментальных данных. Я старался поэтому подыскать, для каких значений этих величин получается наилучшее соответствие между

экспериментальным изменением и изменением теоретическим, исходя из предположения, что вся инерция электрона электромагнитного происхождения. Чтобы исключить указанные константы, я строю две кривые — экспериментальную и теоретическую, представляющие отношение $\frac{e}{m}$ в функции $\beta = \frac{v}{c}$ на

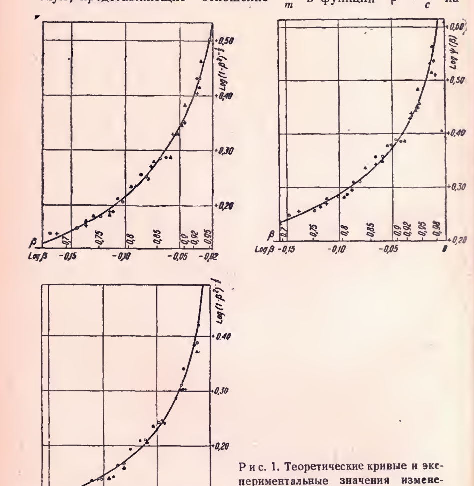

Рис. 1. Теоретические кривые и экспериментальные значения изменений отношения $\frac{e}{m}$ как функции скорости.

логарифмических координатах, и смотрю, для какого положения этих кривых получается (путем переноса) наилучшее совпадение. Результаты показаны на рис. 1 для трех теоретических

кривых и для тех же самых серий экспериментальных значений. Как можно видеть, совпадение здесь примерно одинаковое во всех трех случаях.

Полученные экспериментальным путем точки соответствуют четырем сериям измерений, сделанных Кауфманом, и отмечены различными знаками, которые хорошо можно различить, внимательно изучая рисунки. Наибольшее значение, с точки зрения выбора формулы, имеют те измерения, которые соответствуют скоростям, довольно близким к скорости света, и которые в опытах Кауфмана достигают 95 процентов скорости света. Но в этом случае лучи становятся исключительно трудно отклоняемыми, и точное измерение их почти невозможно. Измеряя изменение скорости, обусловленное электрическим полем, можно найти продольную массу.

Было бы чрезвычайно важно изучить продольную массу путем использования интенсивного электрического поля, параллельного скорости электрона и снабжающего электрон известным количеством энергии.

6. Материя и электроны. Если точность опытов недостаточна, чтобы определить закон во всех его деталях, то совпадение с формулами, предположительно рассчитанными на то, что масса целиком электромагнитна, достаточно удовлетворительно. Поэтому было бы целесообразно допустить, что, по меньшей мере, катодные корпускулы не обладают другой инерцией, кроме инерции, происходящей от их электрического заряда, от того электромагнитного следа, который они увлекают за собой во время своего движения через эфир.

Весьма желательно принять этот же закон и для всей материи, рассматривая ее как скопление электронов обоих знаков. Действительно, для столь тождественных явлений, как инерция материи и инерция катодных корпускулов, нам кажется, нельзя принимать два совершенно различных объяснения, из которых одно, основанное на принципах электромагнетизма, является точным и подтвержденным опытом, а второе остается неизвестным *.

Инерция подобного скопления электронов должна бы равняться сумме частичных инерций вследствие значительного расстояния наэлектризованных центров по сравнению с их радиусами, которые можно вычислить, предполагая, что вся инерция электромагнитна. В этих условиях электромагнитные следы различных электронов не влияют заметным образом друг на друга, и, таким образом, мы снова находим закон сохранения инерции

* Согласно теории относительности, масса всех вообще материальных тел изменяется в зависимости от скорости по одному и тому же закону. Это положение экспериментально обосновано. — *Прим. ред.*

как следствие сохранения электронов при всех изменениях, которым подвергается материя. Однако, вследствие интерференции электромагнитных следов, теория должна предусматривать небольшие расхождения между всей инерцией массы и суммой частичных инерций.

Сложность атомной системы, к которой мы теперь приходим, объясняется тем, что каждый атом или молекула содержит, повидимому, очень большое количество электронов; кроме того, она вытекает также из сложности световых спектров, испускаемых атомами и электронами, которые в них заключаются, когда внешняя пертурбация нарушает систему и выводит ее из состояния устойчивого периодического движения. В сложной системе излучения, испускаемые различными электронами, ввиду ускорений, которые удерживают их в интрамолекулярных орбитах, почти полностью компенсируются в отношении излученной энергии и притом так, что, вообще говоря, не остается заметной причины для амортизации интрамолекулярного периодического движения. Эта концепция, электронная теория материи, согласно которой материя, по крайней мере частично, становится синонимом движущегося электричества, повидимому, соответствует множеству фактов, число которых непрерывно увеличивается благодаря усилиям нетерпеливых физиков, желающих созерцать в менее примитивной форме тот синтез, который обещает нам история *.

7. Устойчивость электрона. Основная концепция, концепция электрона, обязательно влечет за собой некоторые затруднения. Не говоря уже об указанной невозможности представить себе осязательным образом перемещение электрона относительно эфира в его структуре, необходимо, повидимому, допустить что-то другое, кроме его электрического заряда; необходима сила, обеспечивающая единство электрона и препятствующая его заряду рассеяться вследствие взаимоотталкивания элементов, из которых этот заряд состоит.

Форма электрона определяется некоторой связью, обеспечивающей его устойчивость. Условие несжимаемости среды в этом отношении недостаточно, так как сферическая форма в таком случае соответствовала бы только неустойчивому равновесию наэлектризованного тела данного объема, в котором ничто не препятствует деформации.

---

* В настоящее время ясно, что указанная концепция не может охватить всего разнообразия проявлений материи. Открыты новые типы взаимодействий (ядерные силы), которые связывают элементарные частицы, даже вовсе как будто лишенные электрического заряда. Частицы эти оказываются притом значительно более инертными, чем электроны, несмотря на отсутствие электрического заряда и т. п. — *Прим. ред.*

Эта связь, относящаяся к какому-то основному свойству среды и определяющая абсолютно тождественный заряд всех электронов, возможно, находится в тесном отношении к третьей форме активности эфира, третьей форме энергии — форме тяготения, которую наш принцип стационарного интеграла должен был бы принять во внимание, вводя члены, дополнительные к электростатической энергии, но бесконечно меньшие, чем она.

8. Тяготение. Действительно, тяготение остается вне нашего электромагнитного синтеза. Не только ньютоновские силы, повидимому, не распространяются с обычной скоростью всех возмущений, т. е. со скоростью света *; весьма трудно вывести из электромагнетизма также и возможность притяжения нейтральной группы электронов нейтральной группой того же рода, не разрушив самые основы электромагнетизма, а именно, понятие поля или воздействия среды.

Мне представляется вероятным, что тяготение является результатом особого рода активности эфира и некоторого свойства электронов, совершенно отличного от электромагнитных свойств; так что, кроме электрической и магнитной энергий, можно допустить существование и третьей, отличной формы энергии, — энергии тяготения.

Остается уяснить, таким образом, возможна ли и что́ означает эквивалентность перехода этой третьей формы энергии в одну из двух первых, и затем — можем ли мы определить, не прибегая к формальным уравнениям, связь между электрической и магнитной энергиями и их превращение одна в другую при посредстве электронов.

9. Необходимость опыта. Повидимому, есть возможность заставить вернуться силы сцепления в электромагнитную область, — как с точки зрения взаимных притяжений, так и с точки зрения действительной ориентировки в кристаллических средах, — благодаря сложным магнитным и электрическим полям, которые должны окружать нейтральную систему электронов в ее непосредственной близости. Обособленными остаются только силы тяготения, налагающиеся на электромагнитные силы, но из этого, с точки зрения отрицательных результатов всех опытов, предпринятых для того, чтобы установить абсолютное движение земного шара, не возникает никакой трудности. Как мы видели, отрицательные результаты хорошо объясняются в том случае, если все внутренние силы материи имеют своей основой электромагнитное происхождение; но силы тяготения могут быть на них наложены, не внося заметных при этом изменений в результат, потому что их интенсивность чрезвычайно слаба, по сравнению

* Теперь установлено, что гравитационные взаимодействия также передаются с конечной скоростью, равной скорости света. — *Прим. ред.*

с электромагнитными действиями. И поскольку не имеется взаимной компенсации электромагнитных действий во всех относящихся к этому опытах с интерференцией света или равновесием упругой системы, то силы тяготения не играют никакой заметной роли. Было бы весьма интересно изучить такой случай равновесия, в котором бы силы тяготения играли существенную роль. И если равновесие останется независимым от движения всей системы с точностью до величин второго порядка, если мы не сможем с очевидностью установить абсолютного движения, то придется заключить, что силы тяготения изменяются уносящим движением в такой же мере, как и электромагнитные, потому что равновесие не нарушено; это было бы очень важным указанием на необходимость электромагнитного представления тяготения. Пока это не будет установлено, пока опыты по абсолютному движению не заставят нас учитывать силу тяготения, до тех пор наиболее разумным будет рассматривать тяготение как отдельную силу, которая может участвовать в образовании связей внутри электронов, необходимых для их устойчивости; однако это не дает нам возможности уже теперь представить себе, в каком направлении могло бы быть найдено более глубокое понимание свойств эфира и находящихся в нем электронов. Во всяком случае, по ряду соображений, этого, повидимому, нельзя сделать в направлении материального и механического представления об эфире.

VI. КАТОДНЫЕ ЛУЧИ

1. Отношение $\frac{e}{m}$. Прежде чем изучать следствия, вытекающие из электронной концепции материи, я хотел бы рассмотреть несколько вопросов, относящихся к электронам обоих знаков. Наиболее близким образом мы знакомы с отрицательными электронами, которые оказываются тождественными во всех своих свойствах, независимо от того, из какого вещества они получены. Мы уже видели, как прямое измерение зарядов приводит всегда к одним и тем же результатам. Масса, т. е. общий предел при малых скоростях продольных и поперечных масс, может быть определена путем измерения соотношения заряда к массе. Результаты, полученные в опыте с катодными лучами, дают достаточно существенные отклонения, в зависимости от применения различных методов измерения. Первые значения этих величин были получены Дж. Дж. Томсоном; своих результатов он достиг путем комбинирования магнитного отклонения катодных лучей либо с измерением переносимой ими энергии (исходя из тепла, выделенного на спае термоэлектрической пары), либо с отклонением в электрическом поле. Отношение $\frac{e}{m}$, полученное этим путем, близко к 10^7 электромагнитных единиц CGS.

Другой метод, указанный Шустером, был последовательно применен Кауфманом и Симоном. Этот метод состоит в комбинации магнитного отклонения с измерением разности потенциалов, при которой получены катодные лучи, и, повидимому, обладает большей точностью, чем все предыдущие; результаты, которые он дает, совпадают с предельной величиной поперечных масс β-лучей для малых скоростей. Однако метод, примененный Кауфманом и Симоном, значительно отличается от метода Шустера. Полученное число $1{,}86 \cdot 10^7$ почти вдвое больше числа Томсона. Предложенное Томсоном объяснение, по которому катодные лучи, наблюдаемые в трубке Крукса, не образуются всей разностью потенциалов между катодом и поглощающим лучи металлическим цилиндром, но появляются из точки, расположенной перед катодом и обладающей другим потенциалом, повидимому, не вполне удовлетворительно: в этом случае было бы трудно понять постоянство результатов, достигнутых Кауфманом и Симоном, когда условия эксперимента, в особенности разность потенциалов, изменялись бы в очень широких пределах. Один из способов разрешения данного вопроса состоит в следующем: возникшие катодные лучи подвергают воздействию известной дополнительной разности потенциалов, а затем, измеряя изменения, возникающие вследствие этого в их магнитном отклонении, определяют первоначальное падение потенциала, под влиянием которого они были получены.

2. Катодная корпускула. Как бы то ни было, но благодаря результатам, полученным Кауфманом, можно подтвердить тождественность катодных лучей, свойства которых не зависят от газа и от электрода круксовой трубки и β-лучей радия. Измерения Дж. Дж. Томсона и Ленара, произведенные ими на катодных лучах, испускаемых металлической поверхностью, заряженной отрицательно под действием света, и на катодных лучах, самопроизвольно испускаемых раскаленными телами, приводят к признанию той же тождественности.

Ванельт недавно показал, что щелочноземельные окиси обладают в ярко выраженной степени этой же способностью самопроизвольно испускать катодные лучи при повышенной температуре и могут, таким образом, служить удобным средством для производства простых и точных измерений над этим особым видом лучей.

Наконец, известно, что величина явления Зеемана *, в том

* То есть явления расщепления спектральных линий света, испущенного атомом, под действием сильного магнитного поля. Величина этого расщепления прямо пропорциональна магнитному полю и отношению $\frac{e}{m}$. При наблюдении расщепленной линии перпендикулярно магнитному полю она представляется в виде трех линий (триплет). — *Прим. ред.*

случае, когда рассматриваемая спектральная линия представляет собой вид нормального триплета, приводит к заключению, что свет, соответствующий этим линиям, происходит из отрицательно наэлектризованных центров, находящихся в материи и имеющих то же отношение $\frac{e}{m}$, что и катодные частички.

Более того, величина этого отношения, от тысячи до двух тысяч раз большего, чем для атома водорода в электролизе, приводит, вследствие доказанной Таунсендом тождественности электрических зарядов, к признанию катодной корпускулы как массы, по крайней мере, в тысячу раз меньшей, чем атом водорода, т. е. к результату, который полностью согласуется с представлением о материальных атомах как образованных из большого числа электронов обоих знаков.

Если принять предположение, что масса целиком электромагнитного происхождения, тогда окажется, что отношение $\frac{e}{m}$ дает для электрона очень небольшой радиус, а это соответствует концепции, согласно которой размеры электрона считаются ничтожными по сравнению с размерами атомов.

3. Пламя. Очень малая масса катодной корпускулы, а также возможность выделения из материи наэлектризованных центров, в тысячу раз меньших, чем самые малые атомы, подтверждены измерениями подвижности отрицательных ионов в пламени. При этом находят чрезвычайно большие подвижности по сравнению с теми, которые наблюдаются в газах при обычных температурах, а методы кинетической теории газов позволяют вычислить, исходя из этой, установленной на опыте, подвижности, что движущиеся отрицательные центры в пламени обладают массой, приблизительно в тысячу раз меньшей, чем масса атома водорода, и, следовательно, должны быть тождественны с катодными корпускулами.

При обычной температуре ионы значительно менее подвижны, потому что катодная корпускула, образующая ядро отрицательного иона, окружает себя нейтральными молекулами газа в результате простого электростатического притяжения.

VII. ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ; α-ЛУЧИ

1. Лучи Гольдштейна; α-лучи. Наше знание о структуре положительных зарядов значительно меньше продвинулось вперед, чем знание о строении отрицательных зарядов. Два существенных явления обнаруживают присутствие положительно заряженных частиц: кроме положительных ионов в проводящих газах (образованных также путем скопления нейтральных молекул вокруг наэлектризованного центра), мы имеем так называемые каналовые лучи Гольдштейна — поток положительных зарядов к като-

ду. Электрическое и магнитное отклонения этих лучей приводят для отношения $\frac{e}{m}$ к изменяющимся в очень широких пределах величинам, вообще говоря, в несколько тысяч раз меньшим, чем для катодных лучей. Следовательно, масса этих положительных центров должна быть того же порядка, что и масса материальных атомов. α-лучи радиоактивных тел, легко поглощаемые и в особенности легко наблюдаемые на полонии, который не испускает других лучей, вполне подобны так называемым каналовым лучам. Масса этих положительно заряженных частиц того же порядка, что и масса атомов водорода, и их скорость не превышает 20—25 тыс. *км/сек*, так что невозможно проверить, исключительно ли электромагнитного происхождения их масса *. С другой стороны, неизвестно, являются ли положительные электроны столь же простыми, как и отрицательные электроны, или же они являются, например, материальными атомами, потерявшими одну катодную корпускулу.

2. Электроны или атомы. В первой гипотезе, гипотезе электрона, бо́льшая масса положительных центров означает необходимость приписать им значительно меньшие размеры, чем самим катодным корпускулам, так как электромагнитная масса наэлектризованной сферы обратно пропорциональна ее радиусу. Таким образом, принимая эту гипотезу, мы пришли бы к парадоксальному результату: электрон становится тем более инертным (я не сказал бы — более тяжелым), чем он меньше.

Г. А. Вильсон полагает, что он нашел аргумент в пользу этой концепции чрезвычайно малого положительного электрона и, следовательно, очень инертного в том обстоятельстве, что α-лучи значительно менее поглощаемы, чем β-лучи, обладающие той же скоростью. Впрочем, ряд соображений говорит в пользу обратной гипотезы, а именно, что α-частица — это очень сложная и мало отличающаяся от атома частица.

Резерфорд представил серьезные соображения для отождествления α-частиц с атомами гелия, потерявшими одну катодную корпускулу; точно так же и Старк приводит экспериментальные соображения, согласно которым именно положительные центры в пустотных трубках испускают спектральные линии, а это указывает на сложность структуры. Наконец, теория искрового разряда приписывает происхождение катодных лучей удару о катод частиц, образующих лучи Гольдштейна; электрон, меньший, чем сама катодная частица, едва ли сможет произвести достаточно

* Как указывалось в примечании на стр. 83, массы всех вообще частиц, независимо от их природы, меняются со скоростью по одному и тому же закону. Таким образом, эти опыты и не могли бы вообще дать возможности выяснить природу массы положительно заряженных частиц. — *Прим. ред.*

сильное поверхностное возмущение, между тем как атом, неспособный пройти через другое атомное здание и пущенный с большей скоростью, безусловно, произведет весьма существенное местное изменение.

3. Положительный заряд α-лучей. То обстоятельство, что заряд α-лучей до сих пор не мог быть наглядно и непосредственно обнаружен по отрицательному заряду, который должен был приобрести кусок соли полония, испускающего, повидимому, только весьма поглощаемые α-лучи, это следует приписать существенному возмущению, производимому, повидимому, α-лучами или каналовыми лучами в материи, с которой они сталкиваются, и связанному с этой пертурбацией испусканию катодных лучей. Как бы ни высока была степень разреженности газа вокруг кусочка радиоактивного висмута, аналога полония, он не только не принимает самопроизвольно никакого заряда, а, наоборот, быстро теряет свой положительный или отрицательный заряд. Эту потерю нельзя объяснить только ионизирующим действием α-лучей на окружающий весьма разреженный газ. Прохождение α-лучей, т. е. снарядов большого размера, через поверхность радиоактивных тел, которые их испускают, может играть такую же роль, как и удар каналовых лучей о поверхность катода, и, следовательно, вызвать испускание β-лучей, впрочем, обладающих весьма малой проникающей способностью, но присутствия которых, в соединении с наличием α-лучей, достаточно для того, чтобы воспрепятствовать сохранению постоянства заряда радиоактивного тела, каким бы знаком этот заряд ни обладал.

4. Положительные электроны. Хотя известные нам положительные центры не могут рассматриваться как свободные электроны, тем не менее, нам кажется, необходимо допустить существование подобных электронов, так как это позволило бы объяснить явление нейтрализации отрицательных зарядов в атомном здании; известно, что положительные электроны по каким-то причинам не выходят из этого здания иначе, как только с чрезвычайной трудностью, т. е. как раз обратно поведению отрицательных электронов.

Более того, чтобы теория металлов, объясняющая их проводимость присутствием наэлектризованных центров, могущих свободно двигаться под влиянием поля, давала возможность объяснить разнообразные явления в металлах, в частности явление Галля, необходимо допустить, чтобы центры обоих знаков совместно существовали в металле и свободно перемещались по всему его протяжению и чтобы положительными центрами были отнюдь не сами металлические атомы. Последние, образуя собой твердый остов металла, должны рассматриваться как неподвижные. Возможно, что положительные электроны (которых ни одно

из известных нам воздействий не может удержать в газах в отдельном от материальных атомов состоянии) существуют в свободном состоянии и в больших количествах в той совершенно отличной от газов среде, которой являются металлы. В связи с этими положительными центрами возникает много других проблем.

VIII. ТЕОРИЯ МАТЕРИИ. РАДИОАКТИВНОСТЬ

1. Атомная неустойчивость. Рассмотрим теперь несколько подробнее те следствия, к которым приводит концепция материи, как состоящей из электронов обоих знаков, из атомов, образованных наэлектризованными центрами, движущимися под взаимным воздействием. Прежде всего, кроме силы тяготения, интенсивность которой бесконечно мала по сравнению с внутриатомными электрическими силами, обусловливающими все изменения в физическом или химическом состоянии атомов, элементарные законы действия сводятся к силам Лоренца. Как мы видели, эти силы определяют ускорение электрона как функцию электрического и магнитного полей, образованных другими электронами в той точке, где расположен данный электрон. В случае, когда ускорение достаточно, чтобы возникло заметное излучение энергии, передаваемой на расстояние при посредстве волны ускорения, в уравнение движения электрона необходимо, по-видимому, ввести новые члены, а именно — силы, при посредстве которых этот электрон мог бы заимствовать излучаемую им энергию и которые исчезают в случае квазистационарного движения. Однако маловероятно, чтобы в каком-либо экспериментальном случае эти корректирующие члены могли оказаться достаточно заметными.

Точно так же электроны, находящиеся в периодическом движении в материальном атоме, необходимым образом подвержены — на всем протяжении их замкнутых орбит — ускорениям, сопровождающимся излучением энергии, заимствованной из наличия внутренней электрической и магнитной энергии атома. Впрочем, это излучение может быть чрезвычайно слабым, как, например, в простых случаях, когда несколько катодных корпускул циркулирует на равных расстояниях по одной и той же орбите (вокруг положительного центра).

Но это непрерывное излучение, естественно, становится значительно более сильным в том случае, когда атом в результате внешнего толчка оказывается выведенным из своей наиболее устойчивой конфигурации. Для атомного здания это излучение служит причиной его разрушения, и по истечении более или менее долгого времени, в зависимости от структуры атома, наступает его глубокая перестройка — подобно тому, как волчок

падает, когда скорость его вращения достаточно уменьшилась. Если достигнута область неустойчивости, то последующая перестройка может сопровождаться бурным выбрасыванием определенных внутриатомных наэлектризованных центров. Такое представление в некоторой степени воспроизводит картину явлений радиоактивности и последующих изменений в жизни атомов, по поводу чего Резерфорд высказал свою гипотезу.

2. **Внутренняя энергия и выделенная теплота.** Даже очень простой расчет показывает, впрочем, что запас энергии, представленный электрическим и магнитным полями, разделяющими содержащиеся в атоме электроны, достаточно велик для того, чтобы поддерживать в течение более чем десяти миллионов лет выделение теплоты, которое Кюри открыл в солях радия.

Как теперь установлено, жизнь одного атома радия измеряется периодом порядка тысячи лет. Отсюда следует, что каждый атом радия в течение этого исключительно активного периода своей жизни использует примерно только одну десятитысячную часть указанного нами запаса энергии. А это значит, что нет никаких затруднений в понимании того, каким образом громадное выделение радием теплоты может происходить за счет заимствования из запаса внутренней энергии.

Поскольку ни один атом не защищен от этой потери энергии в результате излучения, связанного с ускорением электронов, то следует ожидать общности радиоактивных явлений: атомы, которые мы в настоящее время считаем устойчивыми, в действительности также теряют энергию, но только чрезвычайно медленно.

IX. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

1. **Поляризация.** Я хотел бы в нескольких словах показать, каким образом предыдущая концепция легко приспосабливается к представлению об основных электрических и магнитных свойствах материи и как она впервые сделала возможной попытку создания теории искрового разряда и металлической проводимости.

Общим для всех форм материи свойством является возможность электрической поляризации — причины изменений специфической индуктивной способности в зависимости от природы материи. Эта поляризация представляет собой естественный результат тех изменений, которые привносит внешнее электрическое поле в движение внутренних электронов атома. Это изменение выявляет себя в среднем (во времени) излишке положительных центров на той стороне, куда поле имеет тенденцию их смещать, и в среднем избытке отрицательных зарядов на противоположной стороне. Таким образом, вся система в среднем обнаруживает электрическую полярность.

2. Корпускулярная диссоциация. Если электрическое поле становится достаточно интенсивным, каким оно, например, может быть в течение прохождения одной из очень быстрых пульсаций, которые образуют лучи Рентгена, или же во время прохождения сквозь атом наэлектризованной α - или β -частицы, выброшенной с чрезвычайно большой скоростью, то изменение, произведенное в атоме или в молекуле, может оказаться и более глубоким: катодная частица может оказаться вырванной из «здания», становящегося после этого положительно заряженным. Таким образом, происходит корпускулярная диссоциация, которая позволяет объяснить проводимость, приобретаемую изолирующими средами под влиянием лучей Рентгена или Беккереля, и проявляет себя в особенности в газах или в случаях, когда таким способом высвобожденные наэлектризованные центры могут двигаться наиболее свободно, хотя вследствие электростатического притяжения нейтральных молекул они и окружают себя кортежем, сопровождающим их во время передвижения.

Повидимому, вполне установлено, что отрицательные ионы, таким путем образованные в газе, имеют своими центрами катодные корпускулы, ибо появление катодных лучей в газе производит там отрицательные ионы, тождественные — с точки зрения их подвижности или же способности конденсировать пересыщенные пары воды — тем, о которых мы уже говорили. Тем не менее совершенно необходимо специально заняться измерениями подвижности ионов, возникших от различных причин внутри газов, чтобы убедиться, чем обусловлены различия в подвижностях (а они, повидимому, существуют) — различием ли природы молекул, составляющих кортеж, или же различием наэлектризованных центров, вокруг которых группируются рои молекул.

3. Подвижность и воссоединение. Весьма существенно также было бы иметь возможность при помощи измерений подвижности, зависящей от температуры, проследить за теми изменениями, которые происходят в толще скопления, и сравнить наблюденные при обычной температуре ионы с ионами, несравненно более подвижными, которые наблюдаются в пламени и которые, повидимому, образованы самими наэлектризованными центрами, катодными корпускулами и, возможно, α-частицами. К сожалению, скорость воссоединения ионов еще очень мало известна в ее зависимости от изменений давления и температуры, хотя она, безусловно, играет существенную роль в явлениях искрового разряда в газах с низким давлением. Поэтому было бы весьма важно уделить данному явлению большее внимание, чем это делалось до сих пор.

4. Ионизация через столкновение. Вся современная теория искрового разряда основана на концепции, согласно которой

удар наэлектризованной частицы, находящейся в достаточно быстром движении, о молекулу может вызвать диссоциацию данной молекулы. Эта идея была естественным следствием того известного факта, что катодные лучи или лучи Беккереля, состоящие из подобных же частиц, превращают в проводники газы, через которые они проходят. Если происшедшая корпускулярная диссоциация высвобождает из молекулы катодную корпускулу, то последняя (в случае, когда существующее в газе электрическое поле достаточно велико) также может приобрести достаточно бо́льшую скорость, чтобы в свою очередь вести себя подобно катодному лучу и производить, таким образом, все возрастающее увеличение проводимости.

Таунсенд показал, каким образом этот вывод может быть точно подтвержден экспериментально. Он находит, что в определенных пределах скорости всякое столкновение между катодной корпускулой и молекулой сопровождается корпускулярной диссоциацией.

Однако скорость не должна превышать определенного предела, за которым корпускула или β-частица пронизывает все атомное здание, не произведя там заметной пертурбации.

Искровой разряд может существовать продолжительное время (без того, чтобы внешняя причина поддерживала образование первоначальных наэлектризованных центров, способных произвести диссоциацию) при условии, если положительные центры, по всей вероятности атомы или молекулы, лишенные одной корпускулы, могут сами по себе произвести ту же корпускулярную диссоциацию в момент их столкновения с молекулами, как это, впрочем, вытекает из проводимости, вызываемой в газах α-лучами. Кроме этой основной концепции ионизации ударами, теория искрового разряда должна быть значительно усовершенствована также и в ряде других отношений. Чрезвычайно разнообразны аспекты, которые принимает этот разряд: образование «страт» (туманных полос), первое объяснение которым было дано Дж. Дж. Томсоном; влияние магнитного поля на условия разряда; явления, происходящие на очень малых расстояниях (порядка микрона) между электродами, когда газовые молекулы, казалось бы, не играют уже никакой роли в образовании искорки между электродами, — все эти наиболее важные вопросы должны теперь привлечь к себе пристальное внимание физиков.

5. Электрическая дуга. Наряду с обычным искровым разрядом в виде султана или искры электрическая дуга, обладающая совершенно другим свойством, вызывает новое явление — испускание катодных корпускул поверхностью раскаленных добела тел. Катод в электрической дуге благодаря ударам притекающих к нему положительных ионов доводится до достаточно высокой

температуры, а корпускулы, находящиеся в электроде, как бы испаряются и переносят наибольшую часть тока. Действительно, волосок раскаленного угля может уже при температуре, значительно менее высокой, чем температура вольтовой дуги, испускать катодные частицы, дающие плотность тока 2 ампера на квадратный сантиметр.

6. Катодное испарение. Это явление, известное под названием эффекта Эдисона и в настоящее время очень распространенное, было (с количественной точки зрения) связано Ричардсоном с основной гипотезой кинетической теории металлов, предполагающей присутствие катодных частиц, свободно движущихся внутри проводников.

При обыкновенной температуре эта эмиссия частиц замедляется в такой степени, что становятся возможными электростатические явления, и металл может сохранять постоянный заряд. Действительно, каждая корпускула металла находится в среде с очень высокой диэлектрической постоянной, так что необходимо определенное количество работы, чтобы перевести ее из этой среды в вакуум с диэлектрической постоянной, равной единице. Только корпускулы, обладающие достаточно большой скоростью, могут, выходя из металла, обеспечить производство этой работы, и тогда количество корпускул, совершенно ничтожное при обычной температуре, необычайно быстро увеличивается с повышением температуры.

Ричардсон показал, что изменения, установленные опытом, в точности совпадают с теми изменениями, которые предусматривает кинетическая теория металлов, приписывающая каждой свободной наэлектризованной частице такую же среднюю кинетическую энергию, как и молекулам газа при той же температуре.

7. Металлы. Самопроизвольная диссоциация атомов, допускающаяся кинетической теорией металлов, т. е. отделение наэлектризованных центров, могущих свободно двигаться внутри металла, является следствием высокой диэлектрической постоянной среды, которую представляет собой металл, сообразно законам распределения, предусматриваемым кинетической теорией. Присутствие свободной наэлектризованной частицы в этой или иной области пространства тем более вероятно, чем меньше в этом месте потенциальная энергия, как, например, в среде с большой диэлектрической постоянной.

8. Химические явления. Действуя подобным же образом, вода, обладающая большой диэлектрической постоянной, производит электрическую диссоциацию растворенных в ней солей. Было бы интересно уточнить отношение между этой электролитической диссоциацией, свойственной жидким проводникам, и диссоциацией корпускулярной, обычной, повидимому, для газов

и металлов. В электролитической диссоциации корпускула или корпускулы, потерянные металлическим атомом, вместо того, чтобы остаться свободными, как это имеет место при корпускулярной диссоциации, остаются связанными с атомом или радикалом, образуя отрицательный ион в электролитах. Этот вопрос связан с вопросом об отношениях между современными физическими идеями и химией, отношениях пока еще весьма туманных, но которые чрезвычайно важно осветить. Корпускулярная диссоциация, производимая в газах лучами Рентгена, повидимому, не связана ни с каким химическим изменением, а между тем в воздухе всякая интенсивная ионизация сопровождается образованием озона.

Здесь перед нами совершенно неисследованная область *.

X. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

1. Ампер и Вебер. Сложные явления магнетизма и диамагнетизма до сих пор труднее поддавались исследованию, несмотря на то, что электроны, обращающиеся в атоме по замкнутым орбитам, на первый взгляд реализуют простое представление молекулярных токов Ампера, обладающих способностью ориентироваться под влиянием внешнего поля и тем самым вызывать явление наведенного магнетизма или же индуктивно реагировать, согласно идее Вебера, против этого внешнего поля, как это наблюдается в диамагнитных веществах.

Те ученые, которые старались следовать этой идее, нашли, что она до сих пор остается бесплодной; независимо друг от друга, различные физики пришли к заключению, что гипотеза электронов, движущихся без торможения, не может дать никакого представления о постоянных явлениях магнетизма или диамагнетизма.

В противовес вышеприведенному мнению, мне удалось показать, что именно благодаря электронной гипотезе возможно придать точный смысл идеям Ампера и Вебера и найти для пара- и диамагнетизма совершенно ясные интерпретации, которые требуются, согласно законам, установленным экспериментальным путем П. Кюри. Парамагнетизм, т. е. ослабленная форма ферромагнетизма, изменяется обратно пропорционально абсолютной температуре, в то время как диамагнетизм (в наблюденных случаях, за исключением твердого висмута) показал себя почти независимым от температуры. Теория, которую я предлагаю,

---

* В настоящее время достигнуты существенные успехи в создании электронной теории основных химических явлений, в частности химической связи. Эти успехи основаны на познании специфических квантовых законов движения электронов и других микроскопических частиц. — *Прим. ред.*

позволяет полностью отдать отчет в этих двух фактах. Кроме того, я полагаю возможным осветить с этой точки зрения сложный вопрос о магнитной энергии. Здесь я дам только главные результаты этой работы; в полном виде она будет опубликована в другом месте.

2. Молекулярные токи. Наэлектризованная частица с зарядом e, перемещающаяся со скоростью v, эквивалентна элементу тока силы ev. Из этого легко выводится, что внутримолекулярный ток, образованный электроном, который в период τ описывает орбиту, образующую поверхность S, эквивалентен — по отношению к магнитному полю, находящемуся на большом расстоянии, — магниту с магнитным моментом $M = \frac{eS}{\tau}$, нормальному к плоскости орбиты.

Подобный молекулярный ток соответствовал бы каждому из электронов, находящихся в молекуле, и результирующий из него магнитный момент мог бы быть равным нулю или отличающимся от нуля, в зависимости от степени симметрии молекулярного здания.

3. Диамагнетизм. Если на поле группы таких молекул наложить внешнее магнитное поле, то все молекулярные токи подвергнутся изменению, независящему от того способа, каким произведено это наложение, — только ли установлением дополнительного поля или же смещением молекул в ранее существовавшем магнитном поле. Направление этого изменения, произведенного в молекулярном токе благодаря индукции, всегда соответствует диамагнетизму, причем приращение магнитного момента M будет:

$$\Delta M = -\frac{He^2}{4\pi m} S$$

для случая кругового тока, где H — слагающая магнитного поля, нормальная к плоскости орбиты, а m — масса электрона.

4. Магнитная энергия. Если молекула предполагается неподвижной, то работа, необходимая для изменения молекулярных токов, доставляется электрическим полем, возникающим, в соответствии с уравнениями Герца, во время установления магнитного поля.

В противоположном случае, когда изменение происходит вследствие смещения молекул, эта работа доставляется частичным токам кинетической энергией молекулы или действиями окружающих молекул. Приобретенное в момент образования поля диамагнитное свойство существует, следовательно, несмотря на молекулярно тепловое движение. Это изменение выражается тремя различными способами:

1) Если результирующий магнитный момент молекул равен 0, то субстанция является диамагнитной в обычном смысле

этого слова, и порядок величины диамагнитных постоянных, наблюдаемых в этом случае, полностью совпадает с гипотезой круговых токов, циркулирующих по интрамолякулярным орбитам.

Эта концепция подтверждает установленный Кюри закон независимости между диамагнитными константами и температурой или физическим состоянием.

2) Если результирующий магнитный момент не равен 0, то субстанция обладает парамагнетизмом, всегда маскирующим более слабый общий диамагнетизм. Новое явление, которое своим существованием обязано ориентации молекул, велико сравнительно с первым, когда молекулярная симметрия позволяет ему проявиться *.

Обмен энергии между молекулярными магнитами и внешним магнитным полем или движение всей группы молекул происходит при посредстве диамагнитного изменения. Отсюда можно вывести закон изменения парамагнетизма, происходящего обратно пропорционально абсолютной температуре.

3) Наконец, изменение периода обращения по орбитам соответствует явлению Зеемана, столь же общему, как и сам диамагнетизм. Железо само по себе является диамагнитным до того момента, пока ориентация молекулярных магнитов под воздействием внешнего поля не заставит проявиться парамагнетизм.

Рассматриваемые орбиты, представляющие собой молекулярные токи Ампера, являются также токами нулевого сопротивления в теории диамагнетизма Вебера с той примечательной особенностью, что пронизывающий их магнитный поток остается постоянным, как это предполагал Вебер, только в том случае, если вся инерция электронов целиком электромагнитного происхождения.

С другой стороны, я показал, что орбиты электронов, которые предполагаются круговыми и описываемыми под действием каких-то центральных сил, — не подвергаются никакой деформации под действием внешнего магнитного поля; изменяется только скорость электронов. Таким образом, посредством гипотезы, согласно которой инерция имеет электромагнитное происхождение, представляется возможным составить себе точную и простую концепцию всех фактов магнетизма и диамагнетизма, рассматривая молекулярные токи как не деформирующиеся, но подвижные окружности, обладающие нулевым сопротивлением и громадной самоиндукцией, к которым применимы все обычные законы индукции.

* См. работу Ланжевена «Кинетическая теория магнетизма и магнетоны», помещенную вслед за этой статьей (стр. 101). — *Прим. ред.*

XI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспектива, которую я вкратце обрисовал, полна всяких возможностей, и я полагаю, что в истории физики редко представлялся случай так далеко оглядываться назад и так далеко видеть впереди себя. Относительное значение различных, почти еще неисследованных, частей этой громадной области ныне кажется сильно отличающимся от того, что было в предыдущем столетии; с новой точки зрения различные перспективные планы устанавливаются в новом порядке. Электрические понятия, которые были раскрыты последними, в настоящее время, повидимому, властвуют над всем, подобно тому месту, которое колонизатор интуитивно выбирает для закладки нового города, с тем чтобы оттуда в дальнейшем продвигаться в новые страны.

Механические явления, наиболее очевидные из всех происходящих в материи явлений, раньше всего обратили на себя внимание наших предков и привели их к разработке понятий массы и силы; последние долгое время считались основными, теми, к которым должны были приводиться все прочие понятия. В ходе развития исследования и открытия более скрытых фактов долгое время надеялись связать их со старыми понятиями и считалось, что всему и всюду можно найти объяснения механического порядка.

Современная тенденция, представляющая преимущественное место электромагнитным понятиям, оправдывается, как это я старался показать, тем, что имеется солидная двойная база, на которой покоится понятие электрона: с одной стороны, точное знание электромагнитного эфира, которым мы обязаны Фарадею Максвеллу и Герцу, и, с другой — экспериментальная очевидность, принесенная новыми работами по зернистой структуре электричества.

Уверенность, которую мы испытываем, оглядываясь на прошлое, еще более увеличивается, когда мы всматриваемся в будущее. Уже вся оптика — не только эфира, но также и материи, источника и приемника всех световых волн — получает непосредственное объяснение, которое механика не смогла дать, а сама механика в настоящее время кажется лишь первым приближением, вполне достаточным для всех случаев движения материи, взятой в большой массе, но более полное выражение которой должно искать в динамике электронов. Те концепции, о которых я старался дать общее представление, хотя и являются новыми, но, очевидно, располагаются в самом сердце всей физики и действуют в качестве плодотворного зародыша, кристаллизуя вокруг себя в новом порядке факты, считавшиеся до сих пор самыми отдаленными друг от друга. Упав на почву, прекрасно подготовленную для восприятия, на почву эфира Фарадея, Максвелла и Герца, понятие электрона или движущегося наэлектри-

зованного центра, который произведенные опыты позволяют теперь охватывать уже индивидуально и который образует связь между эфиром и материей, являющейся группировкой электронов, — это понятие всего лишь за несколько лет получило исключительно большое развитие, развитие, которое разрушает рамки старой физики, опрокидывает установленный порядок представлений и законов для того, чтобы достичь новой организации — простой, гармоничной и плодотворной.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ МАГНЕТИЗМА И МАГНЕТОНЫ *

I

Кинетическая теория пара- и ферромагнетизма позволяет вычислить на основании экспериментальных данных молекулярные магнитные моменты.

Наиболее простым случаем является случай *разбавленных* парамагнитных веществ, а именно: парамагнитный газ, как, например, кислород, или разведенные растворы парамагнитных солей. Как показывает опыт, такие вещества обладают восприимчивостью χ, обратно пропорциональной абсолютной температуре. Величину восприимчивости, или коэфициент намагничения на единицу объема, удобнее заменить коэфициентом молекулярного намагничения χ_m, — коэфициентом пропорциональности намагничивающему полю H магнитного момента I, образованного благодаря влиянию этого поля одной грамм-молекулой рассматриваемого вещества.

Закон изменения этого коэфициента в зависимости от температуры определяется формулой

$$\chi_m = \frac{C_m}{T},$$

где C_m — постоянная Кюри на одну грамм-молекулу.

Согласно теории, каждая молекула, вследствие наличия особых токов, обладает магнитным моментом μ. Когда величина этого момента не равна нулю (в этом случае вещества являются диамагнитными), мы предполагаем, что она достаточно велика, чтобы пренебречь ее изменениями, происходящими под влиянием поля H, которые к тому же соответствовали бы диамагнетизму, наложенному на парамагнетизм, возникающий в результате существования молекулярного момента μ.

Если бы все частицы одной грамм-молекулы, число которых равно постоянной Авогадро M, были ориентированы параллельно друг другу, то магнитный момент для грамм-молекулы выразился бы величиной

$$I_0 = \mu M, \tag{1}$$

соответствующей абсолютному насыщению.

---

* Доклад, представленный конгрессу Солвей в 1911 г. — *Прим. ред.*

Этой параллельной ориентации оказывает сопротивление беспорядочное тепловое движение. В случаях *разбавленных* веществ, где взаимно направляющими действиями молекулярных магнитов можно пренебречь, при отсутствии внешнего поля нет никакой преобладающей ориентации, и результирующий магнитный момент I равен нулю.

При наличии внешнего поля H преобладает ориентация, для которой магнитная ось молекулы параллельна этому внешнему полю. Однако естественно, что подобное преобладание тем менее заметно, чем более интенсивно беспорядочное тепловое движение. Если допустить, что к этому случаю можно применить общие выводы статистической механики, тогда можно вычислить результирующий магнитный момент I для одной грамм-молекулы.

Если магнитная ось молекулы момента μ образует с направлением внешнего поля H угол α, то величину относительной потенциальной энергии молекулы и поля можно выразить через $\mu H \cos\alpha$. Закон распределения Больтцмана показывает, что число молекул, магнитные оси которых имеют направления, заключенные в телесном угле $d\omega$ вокруг направления, определяемого углом α, равно:

$$dM = Ce^{\frac{\mu H \cos\alpha}{kT}}\, d\omega = Ce^{\frac{I_0 H \cos\alpha}{RT}}\, d\omega.$$

Постоянная C, отнесенная к одной грамм-молекуле, определяется условием, что общее число молекул равно M, т. е. полагая

$$a = \frac{I_0 H}{RT}, \tag{2}$$

$$M = 2\pi C \int_0^{\pi} e^{a\cos\alpha} \sin\alpha\, d\alpha = 2\pi C \int_{-1}^{+1} e^{ax} dx\ . \tag{3}$$

Участие молекулы направления α в результирующем магнитном моменте I равно $\mu \cos\alpha$, откуда

$$I = 2\pi C\mu \int_0^{\pi} e^{a\cos\alpha} \cos\alpha \cdot \sin\alpha\, d\alpha = 2\pi C_{\mu} \int_{-1}^{+1} x e^{ax} dx. \tag{4}$$

Сравнивая уравнения (3) и (4) и учитывая уравнение (1), получаем:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\int_{-1}^{+1} x e^{ax} dx}{\int_{-1}^{+1} e^{ax} dx} = \frac{ch\, a}{sh\, a} - \frac{1}{a}. \tag{5}$$

Величины молекулярных магнитных моментов, определяемые путем сравнения этой теории с опытными данными, таковы, что I_0 редко достигает значения $3 \cdot 10^4$; таким образом, при обычной температуре максимальное значение a не превышает порядка $10^{-6}H$. Так как величина магнитной индукции полей, которые мы в состоянии создать, не превышает 50 000 гаусс, то значение a всегда остается малым по отношению к единице, если *только одно* внешнее поле H действует на молекулы с целью ориентировать их, как это наблюдается в случае *разбавленных* веществ.

Второй член уравнения (5), развернутый в ряд по возрастающим степеням a, дает для первых членов:

$$\frac{ch\ a}{sh\ a} - \frac{1}{a} = \frac{a}{3} - \frac{a^3}{45} + \ldots,$$

причем, когда a мало по сравнению с единицей, то отношение (5) можно заменить отношением:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{a}{3}$$

или

$$I = \frac{J_0^2}{3RT} H.$$

Это — закон парамагнетизма с молекулярным коэфициентом намагничения:

$$\chi_m = \frac{I^2}{3R},$$

соответствующий закону Кюри и постоянной Кюри:

$$C_m = \frac{I^2}{3R}.$$

Данное отношение позволяет вычислить молекулярный момент насыщения I_0, исходя из постоянной Кюри, полученной опытным путем при помощи соотношения:

$$I_0 = \sqrt{3RC_m}. \tag{6}$$

Я применил эту формулу к кислороду, который, как показал Кюри, в газообразном состоянии следует закону изменения коэфициента намагничения обратно пропорционально абсолютной температуре. Таким образом, для I_0, т. е. для магнитного момента, которым бы обладала одна грамм-молекула, если бы все элементарные магниты были ориентированы параллельно, мы получаем число того же порядка, как и для намагничиваний насыщенного железа, полученных опытным путем.

Та же формула была использована Вейссом для вычисления молекулярных магнитных моментов многих солей на основании коэфициента намагничивания их разбавленного раствора, изменяющегося с изменением температуры в соответствии с законом Кюри. При помощи этого метода он получил большинство экспериментальных данных, на которых основывается его гипотеза о магнетонах.

II

Другие данные соответствуют случаю ферромагнитных веществ и выведены из теории молекулярного поля. Эта теория основывается на существовании взаимных действий между молекулами, на чем я еще не останавливался.

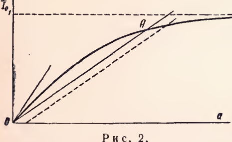

Рис. 2.

Вейсс допускает, что направляющее действие, оказываемое на молекулу окружающим ее намагниченным веществом, эквивалентно наложению на магнитное поле Максвелла *H молекулярного* поля, пропорционального интенсивности намагничения вещества с коэфициентом N, который зависит от природы вещества.

Вполне естественно допустить, что направляющее действие, оказываемое молекулами на одну из них, может быть определено степенью осуществляемого параллелизма. Порядок величины коэфициента N, выведенного Вейссом на основании его теории, а также (в случае сплавов) изменение этого коэфициента в зависимости от состава сплавов кажутся несовместимыми с гипотезой, согласно которой взаимные ориентирующие действия — магнитного происхождения. Они имеют, повидимому, ту же природу, что и направляющие действия, удерживающие ориентированную молекулу кристалла в его решетке.

Гипотеза молекулярного поля сохраняет результат, выраженный уравнением (5), при условии, что

$$a = \frac{I_0}{RT}(H + NI). \tag{7}$$

Введение члена NI дает возможность величине a принимать при том же поле H значительно большие значения, чем при отсутствии взаимных действий, и, следовательно, второму члену уравнения (5) приблизиться к значению I, соответствующему большим значениям a, т. е. позволяет I приблизиться к I_0, соответ-

ствующему абсолютному насыщению (см. рис. 2). Теперь уравнение (5) принимает такой вид, что намагничение I одновременно фигурирует в обоих членах. Чтобы решить это уравнение для I, проще всего применить графический метод.

Отношения (5) и (7) представляют собой два уравнения с неизвестными a и $\frac{I}{I_0}$. Их решение может быть найдено путем пересечения кривых в системе координат a и $\frac{I}{I_0}$.

Кривая, соответствующая уравнению (5), выходит из начала координат с угловым коэфициентом $\frac{1}{3}$ для касательной и стремится к асимптоте $\frac{I}{I}=1$ при $a=\infty$. Уравнение (7) представлено прямой и может быть выражено в форме:

$$a = a_0 + \frac{NI_0^2}{RT} \cdot \frac{I}{I_0}.$$

Начальная абсцисса a_0 — это значение a, соответствующее внешнему полю H и, как указывалось выше, остающееся всегда весьма малым сравнительно с единицей для осуществимых полей. Таким образом, прямая, в масштабе чертежа, проходит очень близко от начала координат.

Угловой коэфициент этой прямой $\frac{RT}{NI^2_0}$ пропорционален абсолютной температуре, так что точка пересечения A, являющаяся искомой величиной $\frac{I}{I_0}$, соответствует тем более полному насыщению, чем меньше температура.

Вблизи абсолютного нуля насыщение I должно быть почти завершено. На основании измерений, произведенных в таких условиях температуры, Камерлинг-Оннес и Вейсс вычислили молекулярные магнитные моменты железа, никеля и кобальта.

Предположим, что намагничивающее поле H изменяется при постоянной температуре, причем температура достаточно низкая, чтобы угловой коэфициент $\frac{RT}{NI_0^2}$ был заметно меньше $\frac{1}{3}$ Тогда, как уже указывалось, прямая весьма незначительно перемещается параллельно себе самой, и интенсивность намагничения I изменяется также весьма мало. Она соответствует насыщению для данной температуры. Нетрудно, впрочем, видеть из характера пересечения прямой и кривой, что достигнутое состояние является устойчивым. Когда величина намагничивающего поля равна нулю, вторая точка пересечения находится в начале координат. Можно легко заметить, что в предполагаемом нами случае, когда прямая OA проходит ниже касательной у начала координат, эта точка пересечения соответствует состоянию

неустойчивости. Следовательно, вещество должно самопроизвольно намагничиваться при отсутствии внешнего поля под влиянием только взаимного действия своих молекул.

Это соответствует экспериментальным данным, так как ферромагнитные вещества представляют собой скопление большого числа кристаллов. Каждый из кристаллов будет произвольно намагничиваться в направлении, определяемом ориентацией его кристаллической решетки и неправильностями его внешней формы. Это направление намагничения различно у различных кристаллов; в том случае, если кристаллы достаточно малы, среднее намагничение будет равно нулю. Исключением являются такие вещества, как магнетит, у которых плоскости правильной решетки большего размера, чем в случае металлов. Необходимость наличия намагничивающего поля для получения насыщения опытным путем соответствует необходимости сделать намагничение различных кристаллов параллельным.

Наличие подобного самопроизвольного намагничения вещества является наиболее характерной особенностью ферромагнетизма. В соответствии с этим, прямая OA должна проходить ниже касательной у начала координат, т. е. чтобы $\frac{RT}{NI_0^2} < \frac{1}{3}$.

Температура Θ, выведенная из соотношения $\Theta = \frac{NI_0^2}{3R}$, соответствует исчезновению ферромагнетизма при увеличении температуры. Эта точка есть точка превращения, установленная Кюри.

Выше этой температуры и при отсутствии намагничивающегося поля прямая встречается с кривой только в начале координат, причем таким образом, что соответствующее состояние устойчиво. Вещество не будет самопроизвольно намагничиваться. Как видно из рис. 2, в этом случае действие намагничивающего поля таково, что намагничение соответствует молекулярному полю NI такого порядка, как и H. Величина a поэтому весьма мала, и уравнение (5) можно написать в следующей форме:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{a}{3},$$

откуда, комбинируя с (7), получим:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{I}{3RT}\,(H + NI)$$

или

$$I\left(T - \frac{NI_0^2}{3R}\right) = \frac{I_0^2}{3R}H.$$

Выражая через C_m постоянную Кюри $\frac{I_0^2}{3R}$, получим:

$$I(T-\Theta)=C_m H.$$

Как и в случае рассмотренного выше парамагнетизма, намагничение должно быть пропорционально полю, а соответствующий молекулярный коэфициент χ_m выражается через $\frac{C_m}{T-\Theta}$. Этот коэфициент, вместо того чтобы изменяться обратно пропорционально абсолютной температуре, что имеет место при отсутствии взаимных действий, изменяется обратно пропорционально избытку этой температуры по сравнению с температурой точки превращения (Кюри); причем он существует лишь тогда, когда этот избыток положителен.

Определение χ_m опытным путем позволяет вычислить постоянную Кюри $C_m=\chi_m(T-\Theta)$ и вывести молекулярный момент $I_0=\sqrt{3RC_m}$.

Этот способ был использован Вейссом и его учениками для большого числа веществ, в особенности для магнетита, ферромагнитных металлов и их сплавов.

III

Случай с магнетитом, при котором использовался указанный нами метод, является одним из первых случаев, направивших Вейсса на путь его гипотезы о магнетонах. Вычисления постоянной Кюри, произведенные для магнетита выше его точки превращения, приводят в определенных промежутках температуры к постоянным значениям, быстро изменяющимся, однако, при переходе от одного из этих промежутков к другому; последнее указывает на то, что при переходе происходит изменение состояния вещества, благодаря чему изменяется его магнитный молекулярный момент. Значения, последовательно принимаемые этой величиной, относятся между собой как целые числа 4, 5, 6, 8 и 10 (точнее, как 4; 4,88; 6,05; 7,96; и 10,06).

Молекулярный момент магнетита увеличивается с увеличением температуры прерывным образом на целые кратные числа одной и той же величины.

Подобное же отношение существует между магнитными молекулярными моментами железа и никеля, выведенными, как уже указывалось, из намагничения до насыщения вблизи абсолютного нуля.

Полученные значения, 12 410 для железа и 3381 для никеля, относятся между собой как 11 : 3, т. е. как целые кратные грамм-магнетона, равного 1123,5.

Применение формулы (6) к большому числу парамагнитных солей стало возможным благодаря измерениям Паскаля, произведенным им на растворах этих солей. Коэфициент намагничения растворенного вещества был получен благодаря аддитивности магнитных свойств этого вещества и растворителя (диамагнитного в случае воды). Абсолютные значения были получены, принимая для воды диамагнитную восприимчивость, равную $0{,}75 \cdot 10^{-6}$ и представляющую собой средние значения величин,

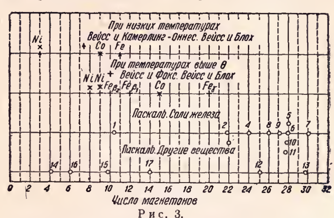

Рис. 3.

1—феррицианид калия и аммония; *2*—пирофосфат железа и аммония; *3*—цитрат железа и аммония; *4*—феррипирофосфат натрия; *5*—феррометафосфат натрия; *6*—хлорное железо; *7*—сульфат железа (окисного); *8*—феррометафосфат калия; *9*—ферроoксалат натрия; *10*—ферропирофосфат натрия; *11*—сульфат железа (закисного); *12*—хлористый кобальт; *13*—сульфат марганца; *14*—перманганат калия; *15*—сульфат меди; *16*—аммиачный сульфат меди; *17*—сульфат уранила.

полученных до настоящего времени различными исследователями. Вычисленные результаты, при условии, что величина магнетона равна 1123,5, представлены на рис. 3. Они указывают на существование определенного порядка в распределении коэфициентов молекулярного намагничения.

Более поздние измерения, произведенные Фейтисом на твердых солях, совпали с ранее полученным порядком распределения.

Наконец, изучение ферромагнитных металлов выше точки Кюри при помощи формулы

$$I_0 = \sqrt{3R\chi_m(T - \Theta)}$$

также дало результаты, подтверждающие в общем гипотезу Вейсса. Чистый никель дает $I = 9018$, что соответствует 8,03 магнетона, при условии, что величина грамм-магнетона равна 1123,5. Эта величина выведена на основании измерений магнитного насыщения при низких температурах.

Сплавы железа и никеля при постепенном уменьшении в них содержания железа дают для I_0 предел 10 140, что соответствует 9,03 магнетона.

Принимая во внимание, что магнитное насыщение никеля при низких температурах соответствует 3 магнетонам, в то время как соли никеля в растворе обладают коэфициентом парамагнитного намагничения, соответствующим 16 магнетонам, находим, что с изменением физического или химического состояния вещества изменяется и молекулярное намагничение. Это изменение всегда происходит на целое число магнетонов и может сравниться с изменениями, наблюдаемыми у магнетита.

При исследовании выше точки Кюри железа получаем, как и для магнетита, три последовательных значения для постоянной Кюри в интервалах температур: 774°, 828°, 920°, 1395°.

Если принять для магнитной частицы или молекулы формулу Fe, то значения, полученные для I_0, не укладываются в общий закон. Эти значения соответствуют числам магнетонов, равным 12,08, 10,04 и 19,85, в том случае, если допускается (на основании тепловых явлений, сопровождающих быстрые изменения коэфициента намагничения) наличие увеличивающейся деполимеризации магнитной молекулы, состоящей соответственно из 3—2 или 1 атома железа во всех трех указанных промежутках температуры.

В настоящее время проводятся более обширные исследования, цель которых состоит в проверке гипотезы опытным путем. Эта проверка будет тем более неоспорима, чем больше будет число использованных данных.

IV

Между гипотезой магнетонов и гипотезой квантов действия существует замечательная связь в той форме, которую ей придал Зоммерфельд. Допустим, что молекулярный магнитный момент возникает вследствие вращения электрона с зарядом e и массой m вокруг центра притяжения, действующего обратно пропорционально n степени расстояния. Если r — радиус орбиты и ω — угловая скорость вращения, то эквивалентный магнитный момент в электромагнитной системе выразится величиной:

$$M = \frac{e\omega r^2}{2}.$$

Если сила притяжения равна

$$\frac{A}{r^{n+1}},$$

потенциальная энергия будет:

$$U = -\frac{1}{n}\cdot\frac{A}{r^n}$$

при условии, что начало координат находится в бесконечности. Так как сила притяжения должна быть равна центробежной силе, то это дает:

$$m\omega^2 r = \frac{A}{r^{n+1}},$$

откуда

$$U = -\frac{m\omega^2 r^2}{n}.$$

С другой стороны, кинетическая энергия равна:

$$T = \frac{m\omega^2 r^2}{2}.$$

Применим гипотезу Зоммерфельда в следующей форме: количество действия, соответствующее некоторому периоду $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$ обращения электрона, должно быть равно $\frac{h}{4}$, причем Зоммерфельд пользуется равным образом выражениями $\frac{h}{4}$ и $\frac{h}{2\pi}$. Уравнение

$$\int_0^\tau (T - U)\,dt = \frac{h}{4}$$

дает

$$m\omega^2 r^2\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{n}\right)\frac{2\pi}{\omega} = \frac{h}{4}$$

или

$$m\omega r^2 = \frac{h}{8\pi}\cdot\frac{2n}{n+2}.$$

Но $m\omega r^2$ пропорционально магнитному моменту M, откуда

$$M = \frac{e}{m}\cdot\frac{h}{8\pi}\cdot\frac{n}{n+2}$$

и для магнитного момента одной грамм-молекулы

$$I_0 = \frac{m}{Me}\cdot\frac{h}{8\pi}\cdot\frac{n}{n+2}.$$

Если бы количество действия для одного оборота, вместо того чтобы соответствовать одному элементу действия h, было целым числом этих элементов, то I_0 было бы кратным предыдущей величины.

Таким образом, благодаря применению теории Зоммерфельда можно проследить замечательную связь между теорией магнетонов и теорией элементов действия.

Аналогичное указание было сделано Гансом на съезде естествоиспытателей в 1911 г. в Карлсруэ, причем вместо количества действия он пользуется лишь кинетической энергией электрона.

Полученное нами уравнение позволяет вычислить момент I, исходя из постоянной h Планка, когда для показателя степени n выбирают специальное значение.

Если допустить, что некоторое притяжение действует обратно пропорционально квадрату расстояния, т. е. $n = 1$, и если

$h = 6{,}5 \cdot 10^{-27}$, $M = 7 \cdot 10^{23}$, $\frac{e}{m} = 1{,}77 \cdot 10^{7}$, мы найдем, что

$$I_0 = 1080.$$

Это указывает на замечательное численное соответствие с величиной 1123,5, выведенной экспериментальным путем из насыщения никеля и железа при низкой температуре Вейссом, изучавшим парамагнитные растворы.

ЭВОЛЮЦИЯ ПОНЯТИЯ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ *

В последнее время внимание физиков вновь привлекли к себе фундаментальные понятия пространства и времени, потребовавшие своего пересмотра в свете новейших экспериментальных фактов. Эмпирическое происхождение этих понятий лучше всего и с полной очевидностью выявляется из еще незавершенного процесса их прогрессирующего приспособления ко все более новым и углубленным достижениям человеческого опыта.

Я хочу показать, что эти понятия, в той форме, в какой мы привыкли ими оперировать, не анализируя в достаточной мере их подлинного смысла, целиком обусловлены механистической теорией, т. е. системой, которая по существу является лишь частной и предварительной синтетической концепцией мира. Наши понятия времени и пространства — это понятия, которых потребовала рациональная механика.

Новое представление о мире, новый и все более и более могущественный синтез, которым является современная электромагнитная теория физических процессов, требует коренного пересмотра известных нам из механики понятий о пространстве и, особенно, времени. В пользу этого говорят также все современные методы экспериментального исследования. Разве не замечательно, что растущее совершенство нашей измерительной методики, позволяющей в некоторых случаях производить измерения с точностью сверх одной миллиардной, вынуждает нас и теперь видоизменять самые фундаментальные категории нашего мышления для их надлежащего приспособления к фактам? Наблюдая за тем, как эволюционируют эти категории, как они живут и преобразовываются на наших глазах, философ имеет хорошую возможность постичь их сокровеннейшую природу.

Понятия времени и пространства не могут быть априорными. Каждому этапу наших познаний, каждой стадии в развитии наших теорий о физическом мире соответствует определенное представление о пространстве и времени. Механицизм породил прежнюю концепцию, электромагнетизм рождает новую, и у нас

---

* Статья, опубликованная в журнале «Scientia» в 1911 г.; печатается с сокращениями. — *Прим. ред.*

нет никаких оснований думать, что эта новая концепция окончательна.

Наш мозг с трудом привыкает к новым формам мышления. Мы можем научиться пользоваться ими, только выработав новый адэкватный язык. Эта задача стоит сейчас перед философами и физиками, и они обязаны разрешить ее совместными усилиями для облегчения эволюции человеческого рода.

* * *

Во всех живых существах заложена способность к внутреннему и самопроизвольному развитию, — тем более мощному, чем лучше они приспособлены к среде, в которой родились. В результате этого происходит столкновение между особями или видами, заканчивающееся взаимным приспособлением, или, когда примирение невозможно, борьбой и выживанием наиболее приспособленных, которые поглощают других и тем самым воссоздают их в новом воплощении, утверждаемом самой жизнью как наилучшее.

То же относится и к физическим теориям. Та или иная из них, оказавшаяся наиболее четкой и логично построенной, блестяще объясняет и группирует в одно целое ряд экспериментальных фактов, придавая сырому материалу соответствующую форму. Затем эта теория начинает самопроизвольно расти, повинуясь своим собственным законам, своему внутреннему ритму, и воздвигает стройные теоретические здания, используя в качестве «строительного» материала факты, уже известные, но еще не обобщенные, факты, открытые благодаря им самим, и, наконец, факты, уже синтезированные в других теориях, которые поглощаются и усваиваются теорией-победительницей.

Подобно тому, как созидательная работа внутри живых организмов облегчается органическим синтезом, уже совершившимся в других существах, которыми они питаются, новая теория сохраняет и использует более или менее полно группировки фактов, известные из прежних теорий, над которыми она восторжествовала.

В наше время мы наблюдаем борьбу между двумя мировоззренческими концепциями, принадлежащими к числу самых блестящих и важных достижений человеческой мысли: между рациональной механикой Галилея — Ньютона и электромагнитной теорией, сформулированной в своем зрелом виде Максвеллом, Герцем и Лоренцем.

Рациональная механика была создана для объяснения явлений видимого движения и вполне преуспела в выполнении своей задачи. На протяжении XVIII и большей половины XIX в. научная мысль делала большие усилия, чтобы распространить этот

эффективный способ объяснения на все физические явления вообще, прилагая законы механики к невидимым движениям материальных частиц или различных флюидов.

Таким образом развилась доктрина, известная под именем механицизма, представляющая собой результат слияния рациональной механики и атомистических гипотез. В некоторых областях физики она имела большой успех, примером чего может служить кинетическая теория газов и жидкостей. В других областях, как оптика и теория упругости, механицизм оказался менее плодотворным.

Следует, кстати, напомнить, что неудачи механицизма часто относили за счет атомистической доктрины, которая в наши дни опирается на неопровержимые экспериментальные доказательства и, в сочетании с электромагнитной теорией, дала столь замечательные плоды за истекшие 15 лет.

В действительности же порочна самая попытка применить к невидимым движениям законы механики, установленные первоначально для видимых движений, — тем более, что даже для последних эти законы являются первым, впрочем, превосходным, приближением.

Теория электромагнитных явлений, в современной ее форме, независима от законов, устанавливаемых рациональной механикой для движений материи, хотя связь с ней чувствуется в некоторых основных определениях. На эту независимость ясно указывают те радикальные разногласия, которые ныне возникают между обеими концепциями.

Электромагнетизм столь же замечательно приспособляется к фактам в определенной области, как, например, рациональная механика в области видимого движения. Со своими весьма специальными понятиями о среде, передающей действия непрерывно от точки к точке, об электрическом и магнитном полях, характеризующих состояние этой среды, о зависимости совершенно нового типа между одновременными изменениями этих полей в пространстве и времени — электромагнетизм представляет собой особый способ мышления, особую дисциплину, в корне отличную от механики и обладающую огромными возможностями развития. Достаточно вспомнить, что электромагнитная теория без труда покорила необъятную область оптики и теплового излучения, перед которой механицизм оказался бессильным, и каждодневно обогащает ее новыми открытиями. Электромагнетизм завоевал большую часть физики, захватил химию, связал и упорядочил громадное число фактов, которые до того оставались неоформленными и разбросанными.

Первая из двух враждующих теорий гордится своим славным прошлым, тем, что ее законы были проверены на отдаленнейших светилах и на мельчайших молекулах газов; вторая тео-

рия, более молодая и более живая, неизмеримо лучше приспособлена к физике в целом и отличается внутренней способностью к росту, которую механика, видимо, уже утратила.

Максвелл считал возможным примирить обе эти доктрины и доказать, что электромагнитные явления могут быть объяснены законами механики. Однако его доводы, относящиеся всего лишь к частному случаю замкнутых токов, доказывают только то, что электромагнитная теория и механика имеют ряд общих признаков, например общее свойство оставлять постоянными некоторые интегралы; но, с другой стороны, они остаются непримиримыми в ряде других отношений.

* * *

Эти противоречия были выявлены в последнее время новейшими экспериментальными данными, а именно — отрицательными результатами всех опытов (из которых некоторые были чрезвычайно тонкими), проводившихся внутри равномерно и прямолинейно движущейся материальной системы с целью обнаружения абсолютного равномерно-поступательного движения всей системы в целом.

Из рациональной механики давно уже известно, что опыты с видимыми движениями, производимые внутри материальной системы, не позволяют обнаружить равномерного поступательного движения всей системы в целом, хотя и дают возможность установить наличие вращательного движения при помощи маятника Фуко или гироскопа. Иначе говоря, с точки зрения механики, равномерно-поступательное движение всей системы, в противоположность вращательному, не имеет абсолютного значения.

Но внутри материальной системы могли быть предприняты и другие опыты, основанные на электромагнитных или оптических явлениях. Электромагнитная теория предполагает наличие эфира, служащего средой, которая передает электрические и магнитные действия и в которой с определенной скоростью распространяются электромагнитные возмущения, в частности свет.

Можно было надеяться, что электромагнитные или оптические опыты внутри материальной системы, равномерно перемещающейся в пространстве по отношению к среде, позволят выявить и сделать очевидным это перемещение.

Поскольку Земля в своем годовом движении имеет поступательную скорость, относительное изменение которой для двух диаметрально противоположных точек земной орбиты достигает 60 *км/сек,* то полагали, что — по крайней мере, в некоторые моменты года — наблюдатели, находящиеся вместе со своими приборами на Земле и перемещающиеся со скоростью того же порядка относительно эфира, смогут обнаружить свое движение.

Надеяться же на это имелись все основания, ибо, соединяя наше обычное представление о пространстве и времени, отвечающее требованиям рациональной механики, с основными уравнениями электромагнетизма, которые считались точными для наблюдателей, неподвижных по отношению к эфиру, можно было думать, что эти уравнения должны измениться по форме для наблюдателей, перемещающихся в эфире, и что разница между скоростями такого порядка, как при движении Земли по ее орбите, может быть в известных условиях обнаружена особо тонкими опытами.

Однако результаты опытов были неизменно отрицательными. Не вдаваясь в объяснения и независимо от них, мы можем считать экспериментальным фактом следующий принцип, именуемый *принципом относительности.*

Если различные группы наблюдателей равномерно-поступательно перемещаются относительно друг друга (например, наблюдатели на Земле при ее различных положениях на орбите), то все механические и физические явления будут подчиняться одним и тем же законам для всех групп наблюдателей *. Опыты, проведенные внутри материальной системы, с которой связан наблюдатель, не позволят ему выявить равномерное поступательное движение всей системы в целом.

К этому можно добавить, что основные уравнения электромагнетизма в их обычной форме будут справедливы для всех групп наблюдателей и что все будет происходить так, как будто наблюдатели неподвижны по отношению к эфиру.

* * *

Таким образом, опыт показывает, что уравнения между физическими величинами, при помощи которых мы формулируем законы внешнего мира, совершенно не изменяются для различ-

---

* Здесь, как и далее, Ланжевен совершенно неправильно связывает формулировку основных положений теории относительности с существованием неких «наблюдателей». В действительности наличие этих «наблюдателей» не имеет отношения к содержанию теории относительности. В теории относительности проблема пространства и времени рассматривается как проблема объективных форм существования материи, свойства которых определяются реальными, не зависящими от «наблюдателя», отношениями материальных тел между собой. Подчеркивание какой-то особой роли «наблюдателя» придает формулировке основных положений теории относительности субъективистский оттенок и открывает лазейку для идеалистических извращений, трактующих пространство и время как чисто субъективные «формы созерцания».

В настоящей статье, особенно в вводной ее части, Ланжевен категорически отмежевывается от идеалистических представлений, подчеркивая эмпирическое происхождение понятий пространства и времени, их обусловленность явлениями объективного мира, их изменяемость в связи со все более и более глуб ким проникновением в сущность материальных процессов. — *Прим. ред.*

ных систем отсчета, перемещающихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга.

Говоря математическим языком, это означает, что данные уравнения допускают группу преобразований, соответствующих переходу от одной системы отсчета к другой. Уравнения физики должны оставаться неизменными для всех преобразований этой группы. Иными словами, при переходе от одной системы отсчета к другой меры различных величин, в частности пространства и времени, должны подвергнуться такому преобразованию, которое соответствует самой структуре этих понятий.

Уравнения рациональной механики действительно допускают группу преобразований, соответствующих изменению системы отсчета, и в отношении мер пространства и времени эти преобразования укладываются в рамку обычной трактовки этих понятий.

Большой заслугой Лоренца является доказательство того, что основные уравнения электромагнетизма также допускают группу преобразований, благодаря чему они сохраняют свою форму при переходе от одной системы отсчета к другой. Однако, что касается пространства и времени, то *эта группа преобразований в корне отличается от группы, относящейся к механике.*

Перед нами возникает проблема выбора. Если мы хотим сохранить абсолютное значение за уравнениями рациональной механики, за механицизмом и соответствующими ему понятиями пространства и времени, необходимо отказаться от уравнений электромагнетизма, отказаться от великолепного синтеза, о котором речь шла выше, и вернуться, например в оптике, к забракованной свыше 50 лет назад корпускулярной теории со всеми ее трудностями. С другой стороны, если мы хотим сохранить электромагнетизм, мы должны приспособить наше мышление к новым представлениям о пространстве и времени, которые он требует, и рассматривать рациональную механику всего лишь как первое приближение, вполне, впрочем, достаточное для движений, скорость которых не превышает нескольких тысяч километров в секунду. Обеспечить дальнейший прогресс науки и играть в ней первенствующую роль, которая, согласно механицизму, должна была принадлежать рациональной механике, может только электромагнетизм или же такая система механики, которая обладала бы той же группой преобразований, что и электромагнетизм.

* * *

Чтобы наглядно продемонстрировать глубокую противоположность обоих синтезов, лучше всего, следуя предложению Минковского, слить понятия о пространстве и времени в одно общее понятие о мире.

Мир — это совокупность всех событий. Событием является то, что происходит, или то, что существует в данном месте и в данное время. При наличии известной системы отсчета, иными словами, системы осей, связанной с группой наблюдателей *, событие, с точки зрения его положения в пространстве и времени, характеризуется четырьмя координатами, отнесенными к этой системе отсчета, — тремя координатами пространства и одной координатой времени.

Два события, характеризуемые при помощи той или иной системы отсчета, обычно отличаются одно от другого своим положением как в пространстве, так и во времени, т. е. происходят в разных местах и в разное время. Таким образом, два события разделяются расстоянием между точками, где они совершаются, и интервалом во времени.

Отсюда следует, что время можно определить с помощью совокупности событий, которые происходят последовательно в одном и том же месте, например, в одной и той же части материи, связанной с данной системой отсчета. Пространство же может быть определено посредством совокупности одновременно совершающихся событий. Такое определение пространства представится вполне логичным, если принять во внимание, что форма движущегося тела определяется совокупностью положений, в которых одновременно находятся все его материальные части или точки, т. е. совокупностью событий, заключающихся в одновременном существовании этих материальных точек. Пользуясь термином «мировая линия», предложенным Минковским, можно сказать, что форма тела в данный момент определяется совокупностью положений, одновременно занимаемых на своих мировых линиях материальными точками, составляющими это тело.

Следовательно, когда речь идет о движущемся теле (а это общий случай), понятие об одновременности событий в различных точках лежит в самой основе определения пространства. *Общепринятое понятие о времени предполагает, что эта одновременность абсолютна и не зависит от системы отсчета.* Эту обычно подразумеваемую гипотезу необходимо проанализировать более тщательно.

Почему мы не хотим допустить, что два события, которые в глазах одной группы наблюдателей происходят одновременно, могут не совпасть во времени для другой группы наблюдателей, перемещающейся по отношению к первой группе? Иначе говоря, почему мы отказываемся предположить, что переход от од-

* Как мы уже подчеркивали, наличие «наблюдателей» совершенно несущественно для рассмотрения всей проблемы. Дело заключается в объективном отношении движущихся материальных тел. — *Прим. ред.*

ной системы отсчета к другой может изменить последовательность событий во времени?

Очевидно, мы молчаливо допускаем, что если два события чередуются в известном порядке, установленном в данной системе отсчета, то первое из них может находиться в причинной связи со вторым и изменять условия, в которых оно совершается, каково бы ни было расстояние обоих событий в пространстве.

В этих условиях было бы, разумеется, абсурдным полагать, что в глазах других наблюдателей, пользующихся иной системой отсчета, второе событие, являющееся следствием, могло предшествовать во времени своей причине.

Таким образом, понятие об абсолютном совпадении событий во времени основано на подразумеваемой гипотезе, что причинность распространяется с бесконечной скоростью и что одно какое-либо событие может мгновенно явиться причиной другого, независимо от расстояния между ними.

Эта гипотеза вполне согласуется с механистической концепцией, более того — является для нее обязательной. Ибо абсолютно твердое тело, описываемое рациональной механикой, или, например, нерастяжимый шнур звонка, протянутый между точками, где совершаются два события, мгновенно дает знать о первом из них там, где происходит второе, и, таким образом, позволяет учитывать и рассматривать первое в качестве причины среди условий, определяющих второе.

Этот пример иллюстрирует взаимное приспособление понятий рациональной механики и обычных понятий о пространстве и времени, согласно которым одновременность двух событий, разделенных в пространстве, мыслится абсолютной.

Совершенно естественно, что в группе преобразований, допускаемых уравнениями механики, *интервал во времени между двумя событиями сохраняется и измеряется одинаково всеми наблюдателями независимо от того, как они перемещаются по отношению друг к другу.*

Иначе обстоит дело с пространством. Общеизвестно, что расстояние между двумя событиями в пространстве не является абсолютной величиной и зависит от системы отсчета.

Следующий конкретный пример показывает, каким образом это расстояние может оказаться различным для различных групп наблюдателей, перемещающихся по отношению друг к другу. Представим себе, что через отверстие в полу движущегося вагона выброшены поочередно два предмета. Два события, заключающиеся в их падении, произойдут в одном и том же месте с точки зрения пассажиров вагона, но в разных местах с точки зрения наблюдателей, находящихся снаружи. Для пассажиров пространство, разделяющее оба события, будет равняться нулю,

а для наблюдателей, находящихся вне вагона, оно выразится произведением скорости, с которым движется вагон, на интервал во времени между падением двух предметов.

Расстояние в пространстве между двумя событиями является абсолютным и не зависит от системы отсчета только в том случае, когда они происходят одновременно. Очевидно, размеры предмета, например длина линейки, также имеют абсолютное значение и остаются одинаковыми для всех наблюдателей независимо от того, перемещается предмет по отношению к ним или нет. В глазах любого наблюдателя, покоящегося или движущегося, длиной линейки является расстояние между двумя ее концами, т. е. пространство, разделяющее два события, заключающихся в одновременном существовании ее обоих концов. Таким образом, как совпадение во времени, так и расстояние в пространстве между двумя одновременными событиями являются абсолютными с точки зрения обычных представлений о пространстве и времени.

Если два каких-либо события разделяются во времени, то всегда можно подобрать систему отсчета, в которой они будут совпадать в пространстве, и найти наблюдателей, для которых они произойдут в одном и том же месте. Для этого достаточно лишь перемещать наблюдателей по отношению к первоначальной системе отсчета таким образом, чтобы они, присутствуя при первом событии, присутствовали и при втором, и тогда оба события произойдут для них в одном и том же месте. Наблюдатели должны при этом перемещаться со скоростью, равной расстоянию, деленному на интервал во времени между событиями, отнесенными к первоначальной системе отсчета. Подобрать требуемую скорость всегда возможно, если только интервал во времени не будет равен нулю, т. е. если события не произойдут одновременно.

Однако то, что достижимо для пространства, а именно — подбор системы отсчета, которая уничтожила бы расстояние, невозможно в отношении времени, так как интервал между событиями во времени является абсолютной величиной и измеряется одинаково во всех системах отсчета.

Эта разница между временем и пространством, вытекающая из обычных представлений о них, отсутствует в новых концепциях, согласно которым интервал во времени, как и расстояние в пространстве, зависит от системы отсчета и изменяется при перемещении наблюдателей.

Единственным исключением является случай, когда события совпадают и во времени и в пространстве. Такое совпадение не может не быть абсолютным, поскольку два события при этом сталкиваются и из их столкновения возникает новое, третье событие, что, несомненно, имеет абсолютный смысл. Вернемся к

упомянутому нами примеру. Если два предмета падают одновременно из одного и того же отверстия в полу вагона, они могут удариться друг о друга и разбиться, причем явление удара будет иметь абсолютный смысл. Ни электромагнитная теория, равно как и механическая, ни любая другая не позволяют одной группе наблюдателей отрицать совпадение событий во времени и пространстве, отмеченное другой группой, как бы они взаимно ни перемещались. В глазах пассажиров вагона, а также тех, кто стоит около железнодорожного полотна, два предмета сталкиваются и разбиваются, ибо они выброшены через одно и то же отверстие в один и тот же момент.

Оговорив этот частный случай, мы легко убеждаемся в том, что электромагнитная теория заставляет нас в корне пересмотреть понятие о мире.

Согласно уравнениям электромагнетизма в их обычном виде, электромагнитная пертурбация, например световая волна, распространяется в пустоте с одинаковой скоростью во всех направлениях, равной примерно 300 тыс. *км/сек*. Результаты новейших экспериментальных исследований говорят о том, что если эти уравнения справедливы для одной группы наблюдателей, они останутся в силе и для всех других групп, как бы последние ни перемещались по отношению к первой группе. Отсюда вытекает тот парадоксальный факт, что данная световая пертурбация должна распространяться с одной и той же скоростью в глазах всех взаимно перемещающихся наблюдателей. Возьмем такой пример: с одного наблюдательного пункта группа наблюдателей видит, что в определенном направлении со скоростью 300 тыс. *км/сек* распространяется световая волна и что в том же направлении движется другая группа наблюдателей; в этих условиях, как бы ни была велика скорость, с которой движется вторая группа наблюдателей, последние также видят, что световая волна распространяется по отношению к ним со скоростью 300 тыс. *км/сек*.

Эйнштейн первый доказал, что это обстоятельство, необходимо вытекающее из электромагнитной теории, позволяет установить новые характеристики для пространства и времени в соответствии с изменившимся представлением о вселенной. Из всего вышесказанного очевидно, что в новых построениях существенную роль должна играть скорость света. Только эта скорость остается неизменной при переходе от одной системы отсчета к другой. Для электромагнитного мира она имеет то же значение, какое имеет бесконечная скорость для механического мира. Это ясно будет видно из нижеследующих соображений.

Для любых двух событий переход от одной системы отсчета к другой изменяет как расстояние в пространстве, так и интервал во времени. Однако, с точки зрения того, насколько эти изменения важны, все события разделяются на две большие категории,

в которых пространство и время соответственно меняются ролями.

Первая категория включает события, расстояние между которыми в пространстве больше, чем путь, проходимый светом в течение интервала, разделяющего их во времени. Если два события этой категории будут сопровождаться испусканием световых сигналов, то каждое из них совершится раньше, чем дойдет световой сигнал, оповещающий о другом событии. Это отношение является абсолютным: будучи установлено для одной системы отсчета, оно остается в силе и при переходе к любой другой системе.

Уравнения преобразования, требуемые электромагнитной теорией, показывают, что в подобных случаях порядок чередования двух событий во времени не носит абсолютного характера. Последовательность, отмеченная одной группой наблюдателей, окажется обратной в глазах второй группы, которая будет перемещаться по отношению к первой со скоростью, меньшей, чем скорость света, т. е. достижимой физически.

Ясно, что два события, порядок чередования которых обратим, не могут находиться в причинной связи между собой. Если бы такая связь существовала, часть наблюдателей увидела бы следствие раньше, чем причину, а это явный абсурд.

Если расстояние между двумя событиями в пространстве превышает путь, проходимый светом в течение разделяющего их промежутка времени, то первое событие успело бы дать сигнал о себе и обусловить второе лишь в том случае, если бы причинность могла распространяться с большей скоростью, чем скорость света. Подобная возможность исключена. Какова бы ни была природа причинности, нет оснований предполагать, что скорость ее распространения может превосходить скорость света. Ни один сигнал, ни один вестник не может передаваться и перемещаться со скоростью, большей 300 тыс. *км/сек.*

Очевидно, следует признать, что всякое событие ощущается мгновенно лишь в том месте, где оно происходит, и отнюдь не может явиться мгновенной причиной другого, пространственно отделенного от него события. Лишь в дальнейшем его отражения становятся заметны на расстояниях, которые возрастают со скоростью, максимально равной скорости света. Мы видим, следовательно, что в новой концепции скорость света играет ту же роль, какая в старых представлениях отводилась бесконечной скорости, рассматриваемой как предельная, с которой может распространяться причинность.

Нетрудно заметить, что наблюдаемый в наши дни антагонизм между механицизмом и электромагнетизмом воскрешает в новой форме ту же борьбу между двумя концепциями в истории развития теорий электричества: концепцией о мгновенном действии на

расстоянии, соответствующей принципам механицизма, и концепцией Фарадея о передаче действий средой по принципу непрерывности от точки к точке. Эта старая борьба в настоящее время затрагивает самые основные понятия физики.

Из всего сказанного вытекает ряд следствий. Во-первых, ни одна часть материи не может перемещаться по отношению к другой части со скоростью, превышающей скорость света. Этот парадоксальный вывод содержится в формулах сложения скоростей, полученных новой кинематикой: при сложении любого числа скоростей, каждая из которых будет меньше скорости света, итог также оказывается меньше, чем скорость света. Это аналогично обычному представлению, что сложение любого числа конечных скоростей дает всегда конечную же скорость.

Далее, необходимо подчеркнуть, что ни одно действие на расстоянии, например тяготение, не может распространяться скорее света. Как известно, этот вывод вполне согласуется с новейшими астрономическими данными.

Наконец, надо отказаться от понятия абсолютно твердого тела в механике, которое позволяло бы мгновенно передавать сигналы на расстояние и обеспечило бы распространение причинности со скоростью, превышающей скорость света. Все, что мы знаем о реальных твердых телах, говорит о том, что любое действие и любая волна распространяются в них медленнее, чем свет. Мы знаем, например, что в самых твердых телах упругие волны имеют в действительности скорость, значительно меньшую скорости света. Важно то, что мы должны отбросить самое представление об абсолютно твердом теле, которое могло бы быть приведено в движение во всех своих точках одновременно.

Вышеприведенные рассуждения можно резюмировать следующим образом. Если бы какой-либо сигнал мог распространяться быстрее, чем свет, то нашлись бы наблюдатели, для которых он прибыл бы на место назначения раньше, чем был отправлен, и причинная связь, устанавливаемая этим сигналом, оказалась бы перевернутой. Тогда, как сказал Эйнштейн, можно было бы «телеграфировать в прошлое», что с нашей точки зрения является абсурдом.

Оба рассматриваемых события, лишенные определенной последовательности во времени, никоим образом не могут влиять друг на друга и являются независимыми в полном смысле этого слова. Ясно, что благодаря отсутствию причинной связи они не могут происходить в одной и той же части материи и не могут быть отнесены к одной и той же мировой линии или к жизни одного и того же существа. И это тем более верно потому, что часть материи, если бы она была местом, где последовательно произошли оба события, должна была бы двигаться со скоростью большей, чем скорость света.

Следовательно, события первой категории никогда не совпадут в пространстве, какова бы ни была система отсчета. Однако они могут совпасть во времени. Поскольку их последовательность обратима, можно подобрать систему отсчета, согласно которой рассматриваемые события произойдут одновременно.

Два события, абсолютно отделенные одно от другого в пространстве, но не имеющие определенной последовательности во времени, могут быть названы *сопряженными в пространстве* или *парами в пространстве.*

Замечательно то, что расстояние между событиями, хотя и не может быть совершенно уничтожено, все же сокращается до минимума при применении системы отсчета, обеспечивающей совпадение событий во времени.

Отсюда вытекает следующее положение:

Расстояние в пространстве между двумя событиями, происходящими одновременно с точки зрения данной группы наблюдателей, будет для них короче, чем для других групп наблюдателей, перемещающихся по отношению к данной группе.

Под это положение подпадает в качестве частного случая так называемое *сокращение Лоренца.* Оно заключается в том, что одна и та же линейка, рассматриваемая различными группами наблюдателей, из которых одни находятся в покое, а другие — в движении по отношению к этой линейке, представляется передвигающимся наблюдателям более короткой, чем находящимся в покое. Действительно, нам уже известно, что наблюдатели, перед которыми проходит линейка, определяют длину этой линейки расстоянием между положениями в пространстве ее концов, видимых одновременно. Из сказанного ясно, что в данном случае расстояние между концами линейки будет для этих наблюдателей меньше, чем это кажется наблюдателям, связанным с линейкой.

Нетрудно понять, что сокращение Лоренца может носить двойственный характер, а именно, что две линейки, имеющие одинаковую длину в состоянии относительного покоя, будут взаимно представляться укороченными при движении одна относительно другой, поскольку наблюдателю, перемещающемуся вместе с одной линейкой, вторая будет казаться короче. Дело в том, что наблюдатели, перемещающиеся вместе с движущимися одна относительно другой линейками, определяют одновременность различным образом.

Вторая категория событий совершенно коррелятивна первой, так как для них пространство и время просто меняются своими ролями. Относящиеся к этой категории события, которые я назвал бы *сопряженными* во времени, или *парами* во времени, характеризуются следующим абсолютным признаком: их разделяет в пространстве расстояние, меньшее, чем путь, проходимый све-

том в течение интервала между ними во времени. Иначе говоря, второе событие совершается после прибытия светового сигнала, отправление которого во времени и в пространстве совпадает с первым событием. Таким образом, фактор времени создает дисимметрию между двумя событиями. Первое из них происходит раньше, чем прибытие сигнала, так как испускание сигнала сопровождает это событие. Возможность причинной связи, осуществляемой посредством света, если не другим каким-либо путем, не исключается. Второе событие совершается в условиях, допускающих наличие первого события. Ввиду этого последовательность событий во времени является абсолютной и не зависит от системы отсчета. Она могла быть обратимой только при переходе к такой системе отсчета, которая перемещалась бы относительно первоначальной системы со скоростью, превышающей скорость света.

Два события, между которыми возможна причинная связь, никогда не совпадут во времени, но соответствующий подбор системы отсчета может обеспечить их совпадение в пространстве. В частности, если они относятся к одной и той же мировой линии и чередуются с абсолютной последовательностью в жизни одной и той же части материи, они будут совпадать в пространстве для наблюдателей, связанных с этой частью материи.

Аналогично тому, что было отмечено для первой категории, интервал во времени между двумя событиями, не исчезая совершенно, достигает минимума при системе отсчета, обеспечивающей их совпадение в пространстве.

Отсюда вытекает следующее положение:

Интервал во времени, разделяющий два события, которые в данной системе отсчета совпадают в пространстве, т. е. происходят последовательно в одной и той же точке, будет меньше для этой системы, чем для любой другой, перемещающейся по отношению к первой равномерно поступательно.

* * *

Все сказанное выше относится к тому случаю, когда системы отсчета обладают равномерным поступательным движением. Лишь в этих условиях связанные с ними наблюдатели не в состоянии обнаружить своего движения экспериментальным путем, и физические уравнения сохраняют свою форму при переходе от одной системы отсчета к другой. Для таких систем все происходит таким образом, как будто в эфире они неподвижны. Равномерное поступательное движение в эфире не может быть обнаружено экспериментально.

Однако нельзя согласиться с тем поспешным выводом, что понятие об эфире должно быть отброшено, что эфира не суще-

ствует, что он недоступен опыту. Если движение в эфире происходит с равномерной скоростью и не может быть установлено, то всякое изменение скорости, всякое ускорение имеет абсолютное значение. В частности, один из основных принципов электромагнетизма гласит, что изменение в скорости, с которой движется наэлектризованный центр, всякое ускорение такого центра необходимо сопровождается испусканием волны, распространяющейся в среде со скоростью света; существование этой волны имеет абсолютный смысл. Справедливо и обратное: любая электромагнитная волна, например световая, образуется в результате ускорения, приданного наэлектризованному центру. Таким образом, эфир можно изучить посредством опыта над ускорением. Ускорение абсолютно, ибо оно определяет испускание волн материей, скорость которой изменилась, а реальное существование эфира доказывается тем, что он служит носителем и передатчиком энергии, распространяющейся волнами.

Теория предвидит возможность посредством электромагнитных или оптических опытов, проведенных внутри материальной системы, обнаружить любое изменение в скорости, с которой движется вся система в целом.

Испускание волн наэлектризованными телами, которые входят в систему и движутся вместе с ней, уже констатирует наличие ускорения. Известно, далее, что ускорение, приданное системе такими внешними силами, которые, в отличие от притяжения, действуют не на всю систему в целом, а только на часть ее, может быть обнаружено многими другими способами. Один из них, например, основан на изучении деформации, появившейся внутри системы при передаче ускорения от части, которая подверглась внешнему воздействию, остальным частям.

В зоне равномерного притяжения, где внешнему воздействию, вызывающему ускорение, подвергается непосредственно каждая часть системы, подобной снаряду Жюля Верна, деформаций не бывает, но изменение общей скорости все же может быть выявлено, как я говорил выше, путем электромагнитных или оптических опытов. Законы электромагнетизма в отношении осей, связанных с ускоренно движущейся материальной системой, будут иметь другую форму, чем в отношении осей, движущихся равномерно поступательно.

* * *

Абсолютная природа ускорения проявляется также и другим образом.

Предположим, что у нас имеется неравномерно движущаяся часть материи, обладающая своей мировой линией, своей жизнью, состоящей из чередования различных событий.

Для двух таких событий, достаточно близких друг к другу, наблюдатели, движущиеся равномерно и присутствующие последовательно при обоих событиях, могут рассматриваться как связанные с этой частью материи, так как изменение скорости в малом промежутке также мало. Для этих наблюдателей разделяющий события интервал, образующий элемент того, что мы назовем *собственным временем* частицы, окажется короче, чем для всех других систем отсчета, обладающих равномерным движением.

Если же взять два события, разделенные интервалом любой продолжительности, то, как видно из сказанного, этот интервал для наблюдателей, неизменно связанных с данной системой и перемещающихся неравномерно вместе с ней, окажется короче, чем для наблюдателей, находящихся в равномерно движущейся системе.

При системе отсчета, обеспечивающей совпадение событий в пространстве, наша часть материи опишет полный круг и, двигаясь неравномерно, вернется к моменту второго события в ту же точку, где она была, когда произошло первое. *Поэтому мы можем утверждать, что для наблюдателей, перемещающихся вместе с рассматриваемой частью материи, интервал между отправлением в путь и возвращением, измеряемый собственным временем частицы, окажется короче, чем для наблюдателей системы отсчета, движущейся равномерно.* Иными словами, наша часть материи меньше состарится во время пути, чем если бы она не получила ускорения и осталась неподвижной относительно системы отсчета, обладающей равномерным поступательным движением.

Итак, чтобы сохранить молодость, надо жить бурно и беспокойно, надо ускорять свое движение. Что же этим можно выиграть?

Возьмем конкретный пример. Представим себе, что на земле, движение которой можно рассматривать как равномерно поступательное, находится лаборатория с двумя совершенно одинаковыми образцами радия. Известно, что радиоактивные вещества подвергаются спонтанным изменениям и постепенно разрушаются. Если оба образца останутся в лаборатории, они будут разрушаться одновременно, и активность их одинаково понизится. Но предположим, что один образец выброшен наружу с достаточно большой скоростью, а затем возвращен в лабораторию. Движение его вне лаборатории обязательно будет неравномерным, хотя бы на отдельных своих этапах. Благодаря этому его собственное время, истекшее между отправлением в путь и возвращением, окажется короче, чем интервал, разделяющий те же два события с точки зрения наблюдателей из лаборатории. Он не успеет подвергнуться такому же разрушению, как образец, остав-

шийся на месте, и проявит более высокую активность. Бурное движение сохранит ему «молодость». Согласно подсчетам, блуждающий образец радия во время пути должен иметь скорость около 4000 *км/сек*, чтобы получить превосходство в активности в одну десятитысячную.

* * *

Все эти соображения я высказал лишь для того, чтобы на примере показать, к каким последствиям, весьма удаленным от обычных концепций, приводит новая форма понятий пространства и времени. Следует иметь в виду, что именно здесь находится абсолютно правильное развитие заключений, требуемых неоспоримыми экспериментальными фактами, о которых наши предки не имели никакого понятия, когда они устанавливали — на основе своего опыта, синтезированного в механистическом мировоззрении, — те категории пространства и времени, которые мы унаследовали от них. Нам надлежит продолжить их труд, продолжить с большей точностью, в соответствии с теми средствами, которыми мы располагаем, — приспособлением мысли к фактам.

Однако не только в области пространства и времени напрашивается пересмотр наиболее фундаментальных концепций механистического синтеза. Масса, при помощи которой измерялась инерция — первоначальный атрибут материи, — рассматривалась как существенно неизменяемый элемент, характеризующий данную часть материи. В настоящее время это понятие стирается и соединяется с понятием энергии: масса какой-либо части материи изменяется в зависимости от внутренней энергии последней, увеличивается и уменьшается с изменением энергии. Материя, излучающая энергию, теряет свою инерцию в количестве, пропорциональном излученной энергии. Энергия инертна; материя сопротивляется изменению скорости только пропорционально энергии, которую она содержит.

Понятие энергии само по себе теряет свой абсолютный смысл: ее мера меняется в зависимости от системы отсчета, к которой относятся явления. И физики в настоящее время ищут в выражении мировых законов N — каковы же действительные элементы, обладающие абсолютным значением, элементы, которые остаются инвариантными при переходе от одной системы отсчета к другой и которые будут играть в электромагнитной концепции вселенной ту же роль, какую играли в механистическом синтезе время, масса и энергия.

ВРЕМЯ, ПРОСТРАНСТВО И ПРИЧИННОСТЬ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ *

Неоспоримые экспериментальные факты приводят нас к необходимости признать принципиальную невозможность обнаружения прямолинейного и равномерного движения материальной системы в целом при помощи опытов любого рода, которые были проведены внутри этой системы (принцип относительности).

Совокупность фундаментальных законов физики находится в абсолютной гармонии с этим принципом при условии изменения обычных понятий пространства и времени рациональной механики. Эти изменения касаются особенно понятия одновременности, теряющего свое абсолютное значение, а также отношения причины к следствию, которое можно установить на расстоянии только по истечении времени, превышающего определенный предел; наконец, они приводят к возможности изменения течения времени **.

Я попытаюсь указать вам, как можно яснее, на новые факты, заставившие физиков изменить те привычные концепции пространства и времени, которых требовали законы классической механики, изменить убеждение в том, что на основе этих законов можно объяснить все явления.

Открытие новых экспериментальных фактов благодаря усовершенствованным средствам исследования позволило нам проникнуть в неизвестную до сих пор область и заставило пересмотреть старые понятия, созданные и переданные нам нашими предками, не знавшими этих фактов.

Язык, на котором выражаются физики, нередко отличается от языка философов, и поэтому в целях лучшего взаимопонимания следует избегать употребления тех слов, которые могут быть истолкованы по-разному. Примерно в этом заключается разногласие, касающееся вопроса времени. Для большинства философов

---

* Сообщение, сделанное во Французском философском обществе 19 октября 1911 г. — *Прим. ред.*

** Для развития этих идей см. доклад Ланжевена на конгрессе в Болонье, опубликованый в журнале «Scientia», XIX—3, 1911. См. также краткий отчет об этой конференции, появившийся в журнале «Revue de Mëtaphysique et de Morale» в июле 1911 г.

это понятие смешивается с понятием последовательности состояний сознания одного и того же индивидуума, событий, которые следуют друг за другом в одной и той же части материи; физики же должны рассматривать события, происходящие в различных местах, а также специально уточнять понятие одновременности *. Они поставили себе вопрос: что́ подразумевать под понятием одновременности и последовательности двух событий, отстоящих друг от друга в пространстве? Как мы ниже увидим, значительная часть новейших работ касается ответа именно на этот вопрос. С точки зрения обычных концепций, или концепций механики, одновременность или порядок последовательности двух событий, отстоящих друг от друга в пространстве, имеет абсолютное значение, независимое от наблюдателей **. В новейших концепциях, наоборот, это значение чисто относительное: два события, одновременные для определенных наблюдателей, не являются таковыми для других, находящихся в движении по отношению к первым; два события, следующие друг за другом в определенной последовательности для первых наблюдателей, могут следовать для вторых в обратной последовательности. Время философа соответствует последовательности очень своеобразной частной серии событий, происходящих в одной и той же части материи или в одном и том же сознании; с точки зрения измерения, это время смешивается с тем, что́ мы будем называть «собственным временем» некоторой части материи. Необходимо поставить вопрос о сравнении «собственных времен» различных частей материи, находящихся в движении относительно друг друга.

---

* В этих рассуждениях Ланжевен допускает большую непоследовательность, смешивая всех философов-материалистов с идеалистами и противопоставляя как тем, так и другим всех вообще физиков. Такое противопоставление неправомерно. Дело не в том, что якобы *все* философы судят о времени по событиям, происходящим в одних и тех же точках пространства, а *все* физики — по событиям, происходящим в различных местах пространства. Подлинный водораздел между различными представлениями о времени, как философов, так и физиков, устанавливается ответом на вопрос: является ли время объективной формой бытия материи (как это признают материалисты), или же оно только форма созерцания, последовательность состояний сознания (как утверждают идеалисты)? Ланжевен совершенно отчетливо признает объективную реальность времени. Таким образом, он оказывается в одном лагере с философами и физиками, разделяющими материалистические убеждения. — *Прим. ред.*

** Дело здесь, как и во всем дальнейшем изложении, вовсе не в наблюдателях. Ни одновременность событий, ни их последовательность во времени не зависят не только от желаний и воли познающего наблюдателя, но и вообще от его существования. Суть заключается в установлении зависимости времени от реального, объективного движения материальных тел относительно друг друга. Вот эту-то проблему и рассматривает Ланжевен, нередко применяя неудачную терминологию. — *Прим. ред.*

* * *

Чтобы ответить на подобные вопросы, необходимо считаться с новыми результатами; эти результаты можно резюмировать в принципе, всеобщее значение которого было признано только недавно — принципе относительности.

Если даны различные группы наблюдателей, находящихся в равномерном и прямолинейном движении относительно друг друга, то законы физических явлений будут в точности одни и те же для всех этих наблюдателей.

Этот принцип вытекает из отрицательного результата всех опытов, поставленных с целью обнаружения равномерного и прямолинейного движения материальной системы наблюдателями, находящимися внутри этой системы.

Чтобы лучше понять значение этого принципа и видеть, каким образом этот принцип выражается точным языком математиков, необходимо вспомнить частные случаи относительности, которые были известны и раньше.

Прежде всего, существует относительность пространства. Каждый наблюдатель изучает пространство со своей, личной точки зрения, и вид вещей изменяется в зависимости от того, какую позицию он занимает. Однако, несмотря на это, в понятии пространства оказалось возможным выделить некую реальность, находящуюся вне каждого из нас, независимую от частной системы, к которой мы ее относим и изучение которой составляет объект геометрии. Принцип относительности пространства состоит в том, что законы геометрии независимы от частной точки зрения, с которой наблюдается пространство. Такова точная формулировка данного принципа.

Пространство может быть отнесено к различным системам координат; каждый наблюдатель имеет свою систему координат. Такая система образуется тремя осями, которые мы будем предполагать находящимися под прямым углом друг к другу; одна точка пространства определяется тремя координатами: x, y, z, представляющими собой расстояние от этой точки до трех плоскостей, образуемых осями. Координаты одной и той же точки меняются в зависимости от системы, к которой их относят, и становятся, например, x', y', z' в новой системе. Формулами трансформации координат называют отношения, выражающие старые координаты x, y, z как функцию новых координат x', y', z'.

Этим отношениям соответствуют шесть параметров, определяющих относительные положения двух систем осей. Существенным свойством этих трансформаций является то, что они составляют группу. Это значит, что если мы производим последова-

тельно две трансформации этого рода, а именно: если первая соответствует переходу от системы x, y, z к системе $x', y' z'$, а вторая — от системы x', y', z' к третьей системе x'', y'', z'', то результат — отношение между координатами x, y, z и x'', y'', z'' — выражается формулами того же рода, соответствующими непосредственному переходу от первой системы осей к третьей системе. Комплекс этих трансформаций координат, соответствующий всем возможным значениям 6 параметров, характеризующих трансформации, обладает тем свойством, что последовательное употребление какого-либо числа трансформаций данной группы эквивалентно одной трансформации той же группы. Эта группа может быть определена также при помощи следующего свойства. Если мы рассматриваем две точки с координатами x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2 в первой системе и x'_1, y'_1, z'_1; x'_2, y'_2, z'_2 во второй системе, то, несмотря на изменение координат, один элемент, одна функция 6 координат остается инвариантной (неизменяемой) для всех трансформаций. Этот элемент есть расстояние двух точек, квадрат которого d^2 имеет своим значением:

$$d^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 =$$
$$= (x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2 + (z_2' - z_1')^2.$$

Следовательно, формулы, выражающие x, y, z в качестве функции x', y', z', должны удовлетворять следующему условию: если в выражении

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

заменить x, y, z их значениями в функции от x', y', z', то результат должен принять тот же вид:

$$(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2 + (z_2' - z_1')^2,$$

причем это условие достаточно для того, чтобы определить всю группу трансформаций.

Следовательно, в фигуре, образованной двумя точками, имеется элемент — расстояние между этими двумя точками, который остается инвариантным, каково бы ни было изменение систем осей. Можно сказать, что этот элемент присущ фигуре и составляет реальность, не зависимую от любой системы осей. В более сложных фигурах включаются другие инвариантные элементы, другие функции координат точек фигуры (расстояния, углы и т. д.), которые характеризуют фигуры независимо от примененной системы осей. Чистая геометрия имеет дело исключительно с подобными элементами и передает свойства фигур через отношения между этими элементами. Так, свойство фигу-

ры, образованной четырьмя точками, быть квадратом, выражается по меньшей мере пятью отношениями между расстояниями этих четырех точек и углами, которые они образуют. Первое отношение выразит, что эти четыре точки находятся в одной и той же плоскости, три других — что каждая из сторон квадрата равна каждой из трех других сторон, и последнее — что два смежных угла равны.

Таким образом, пространственные свойства, переведенные на язык геометрии, могут выражаться, как это делает аналитическая геометрия Декарта, отношениями между координатами точек фигур, в данном случае — пятью отношениями между двенадцатью координатами четырех вершин квадрата. Форма этих отношений должна быть, очевидно, независимой от принятой системы осей и должна сохраняться, когда в нее будут подставлены (при помощи формул трансформации) старые координаты в качестве функций координат, относящихся к новой системе осей.

Вследствие этого, уравнения, выражающие свойства фигур или законы геометрии на языке координат, должны иметь одну и ту же форму во всех системах осей, причем форма должна быть инвариантной для всех преобразований группы геометрии. Эта инвариантность формы отношений, передающих законы геометрии, несмотря на изменение координат, соответствует реальности, независимой от системы осей, именно пространству эвклидовой геометрии. Следовательно, выражение законов на эвклидовом языке будет более простым. *Принцип относительности пространства есть подтверждение такой инвариантности и существования внешней реальности пространства.*

Аналогичным образом законы физических явлений выражаются отношениями между различными величинами, которые входят в них одновременно, и такими, какими их измеряет определенная группа наблюдателей. Если какая-либо другая группа наблюдателей, находящаяся в движении по отношению к первой, наблюдает то же самое явление, то измеряемые величины в общем изменятся; таким образом, принцип относительности, высказанный выше, подтверждает, что, несмотря на это изменение, форма отношений, *выражающих собой законы явлений, останется инвариантной.*

Это и есть точная формулировка, которую необходимо понять; подобно эвклидовой геометрии, она предвосхищает возможность создания точного языка, который будет пользоваться исключительно инвариантными элементами, с измерениями, независимыми от частной группы наблюдателей и от их частного движения. Язык этот соответствует более высокой реальности, чем реальность пространства; физики начинают раскрывать ее, согласно Минковскому, под именем *вселенной*. Ниже я укажу,

что во вселенной синтезируются относительные понятия пространства и времени.

* * *

Частный аспект общего принципа относительности * был признан основателями механики и выражен уравнениями движения.

Здесь имеется в виду, что опыты чисто механического характера, производимые внутри системы, находящейся в равномерном и прямолинейном движении, не могут обнаружить этого движения; иначе говоря, не существует абсолютного прямолинейного поступательного движения. Систему отсчета координат, находящуюся в движении, по отношению к которой оправдываются законы классической механики, или любую другую систему, находящуюся в равномерном и прямолинейном движении по отношению к первой, мы будем называть *галилеевой системой*. Относительность в механике выражается в том, что указанные нами различные системы ничем не отличаются друг от друга и что уравнения механики должны сохранять свою форму, когда в них подставляют измерения, сделанные данной группой наблюдателей, как функции измерений, полученных для тех же элементов другой группой наблюдателей, находящейся в прямолинейном и равномерном движении по отношению к первой. Эти элементы различны: кинематика вводит, наравне с пространством, понятие времени, а также производные понятия скорости и ускорения; статика и динамика добавляют понятия силы, массы, работы и т. д.

Фундаментальным постулатом классической механики является тот, в котором время играет роль одного из рассмотренных нами инвариантов; я буду называть это *гипотезой абсолютного времени*.

Возьмем два события, например два последовательных положения движущегося тела: каждое из них определено своим положением в пространстве, где находится движущееся тело в данный момент. Таким образом, событие характеризуется (с точки зрения его положения в пространстве и во времени) четырьмя координатами: x, y, z, t — тремя для пространства и одной для времени. Для одного и того же события эти координаты изменяются, очевидно, вместе с изменением принятой системы координат. Если t_1 и t_2 представляют собой положения во времени наших двух событий, то механика, а вместе с ней и здравый смысл требуют, чтобы интервал времени $t_2 - t_1$ между

* Термин «общий принцип относительности» здесь употреблен в смысле распространения принципа равноправия равномерно и прямолинейно движущихся систем координат на *все вообще*, — а не только механические, как раньше, — *физические явления;* его не следует путать с «общей теорией относительности», разработанной пятью годами позже. — *Прим. ред.*

событиями имел абсолютный смысл, не зависящий от системы координат. При этом — без всякого уточнения вопроса о том, как измерить данный интервал времени между двумя событиями, удаленными друг от друга в пространстве, — допускают, что это измерение одинаково для всех групп наблюдателей. Одновременность двух событий соответствует нулевому значению, порядок последовательности определен знаком этого инвариантного количества; отсюда следует абсолютный характер этих понятий — одновременности и порядка последовательности.

Если для механики интервал во времени двух событий имеет абсолютное значение, то в отношении их расстояния в пространстве этого нельзя сказать. Для того чтобы показать, что это расстояние существенно изменяется в зависимости от группы наблюдателей, достаточно привести простой пример.

Представим себе вагон, находящийся в движении по отношению к земле, и предположим, что через отверстие в полу вагона последовательно заставляют падать два предмета. Для наблюдателей, находящихся в вагоне, эти события происходят в одной и той же точке и, следовательно, имеют между собой нулевое расстояние в пространстве; и наоборот, для наблюдателей, находящихся на земле, они происходят в различных точках, причем расстояние между ними в пространстве во втором случае равно пути, пройденному вагоном в течение того промежутка времени, который разделяет оба события.

Таким образом, если расстояние в пространстве последовательных событий меняется в зависимости от используемой системы координат и если дело обстоит иначе в отношении одновременности, т. е. интервала во времени или порядке последовательности двух событий, то в этом случае можно сказать, что роль времени и пространства в концепции вселенной, даваемой классической механикой, различна; в последней время рассматривается как инвариант. Как мы ниже увидим, эта дисимметрия между свойствами пространства и времени — такими, каких требует механика, — исчезает в более общей концепции, которая вытекает из новой формы принципа относительности.

Заметим, что если речь идет о событиях одновременных, то, в обычном понимании вселенной, расстояние в пространстве независимо от движения наблюдателей. Иначе говоря, в этой концепции форма тела, определенная всем комплексом одновременных положений материальных точек, составляющих данное тело, независима от движения наблюдателей; она (форма) имеет абсолютное значение. С этой точки зрения, привычные нам понятия вводят абсолютное время и абсолютное пространство.

Прежде всего посмотрим, в какой форме представляются изменения пространства и времени, совместимые с классической механикой, когда переходят от одной системы координат к другой,

находящейся в равномерном и прямолинейном движении относительно первой. Пусть x, y, z, t — координаты одного события в первой системе; x', y', z', t' — координаты этого же события в другой системе, которую мы в целях упрощения будем предполагать движущейся по отношению к первой со скоростью v в направлении оси x; причем остальные оси имеют в обеих системах те же направления. Гипотеза абсолютного времени приводит к равенству $t=t'$ при условии, что начальные координаты времени одинаковы в обеих системах. В этом, наиболее простом случае мы будем иметь в качестве соотношений между координатами пространства:

$$x=x'-vt, \quad y=y', \quad z=z'.$$

Приведенные нами четыре отношения определяют трансформацию, зависящую только от одного параметра v, и все изменения такого же рода, соответствующие всем возможным значениям v, составляют группу, которую можно назвать *группой Галилея*.

Основные уравнения механики в наиболее простом случае движения материальной точки вводят еще массу m этой точки и ускорение, составляющими которых соответственно являются:

$$\frac{d^2x}{dt^2}, \quad \frac{d^2y}{dt^2}, \quad \frac{d^2z}{dt^2},$$

а также силу, составляющими которой, соответственно трем осям, будут X, Y, Z.

Допустим, вместе с Ньютоном, что масса является инвариантом, т. е. что измерение массы одно и то же для всех групп наблюдателей и что составляющие силы ведут себя при преобразовании как при проекции некоторого расстояния на оси, т. е. остаются постоянными в том частном случае, который мы рассматриваем именно тогда, когда оси x, y, z и x', y', z' имеют одну и ту же направленность. Составляющие ускорения

$$\frac{d^2x}{dt^2}, \quad \frac{d^2y}{dt^2}, \quad \frac{d^2z}{dt^2},$$

если в них заменить x, y, z и t через их функции от x', y', z', t', превращается в

$$\frac{d^2x'}{dt'^2}, \quad \frac{d^2y'}{dt'^2}, \quad \frac{d^2z'}{dt'^2}.$$

Отсюда вытекает, что уравнения динамики точки

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=X,$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = Y,$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = Z,$$

если в них заменить массу, ускорение и силу, измеренные в первой системе координат, их измерениями, произведенными в другой системе координат, — переходят в

$$m' \frac{d^2x'}{dt'^2} = X',$$

$$m' \frac{d^2y'}{dt'^2} = Y',$$

$$m' \frac{d^2z'}{dt'^2} = Z',$$

т. е. сохраняют свою форму. Эта инвариантность формы аналитически выражает принцип относительности в механике: *законы движения остаются одни и те же вне зависимости от принятой системы отсчета.*

Подобно геометрии, механика также обладает точным языком, который выражает эту инвариантность формы посредством отношений между инвариантными элементами, независимыми от системы отсчета. Одни из этих инвариантных элементов являются скалярными, т. е. не направленными, например время и масса, другие — векториальными, как ускорение или сила.

Действительно, изобразим ускорение движущегося тела при помощи вектора γ, т. е. направленным прямолинейным отрезком, имеющим в качестве своих проекций на какую-либо систему осей составляющие ускорения; силу изобразим другим вектором **F** с проекциями X, Y, Z — и тогда законы динамики нашей точки выразятся одной точной формулой:

$$\mathbf{F} = m\gamma.$$

* * *

В механике, как и в геометрии, в которой пространство рассматривается независимым от частных осей координат, можно выделить — для совокупности понятий пространства и времени — реальность, независимую от систем отсчета, находящихся в движении относительно друг друга; причем эту реальность можно отнести к системам отсчета таким же образом, как и в геометрии реальность пространства.

Минковский предложил назвать эту реальность *вселенной,* определяемой как *совокупность событий,* подобно тому как геометрическое пространство определяется как совокупность точек.

Событие, с точки зрения пространства и времени, можно определить как что-то существующее или происходящее в определенной точке и в определенный момент времени, причем точка и момент зависят от принятой системы координат; однако событие воспринимается нами как независимое — точно так, как в геометрии координаты точки зависят от системы осей, но сама точка мыслится независимой реальностью.

Выражаясь этим языком, пространство должно быть определено как совокупность одновременных событий; точнее говоря, эта концепция приводит нас к определению формы тела, находящегося в движении, как совокупности положений, занимаемых одновременно различными материальными точками, которые образуют это тело. Это равносильно тому, что сказать: для определения пространства достаточно принять во внимание только состояние системы в данный момент, или: в более сложном комплексе — вселенной — *следует сделать сечение в данный момент времени.*

Чрезвычайно простая концепция вселенной, совместимая с механикой и определяющая собой группу Галилея, обладает той особенностью, что форма тела независима от системы отсчета; или — что все эти системы имеют одно и то же пространство, подобно тому как они имеют одно и то же время, согласно гипотезе об абсолютном времени.

Вселенная механики, инвариантная в целом, разлагается, таким образом, на две составляющие — время и пространство, каждая из которых в отдельности инвариантна. Мы увидим ниже, что в концепции вселенной, соответствующей новым теориям, дело обстоит не так, и это объясняет, почему общее понятие вселенной, скрыто содержавшееся в старых представлениях, было четко выражено только после отказа от группы Галилея, что потребовалось в результате новейших экспериментальных открытий.

* * *

В течение XVIII и большей части XIX в. считалось возможным давать всем физическим явлениям механические объяснения, признавая законы механического движения в качестве простейших явлений, служащих отправным пунктом для каждого объяснения. С этой точки зрения, законы физики должны обладать, подобно законам механики, способностью сохранять свою

форму при всех трансформациях группы Галилея, совместимых с понятием абсолютного времени.

Покажем, что, принимая для оптических явлений волновую теорию, введенную в результате опыта, гипотеза абсолютного времени не допускает такого случая, чтобы распространение света происходило с одной и той же скоростью во всех направлениях для различных групп наблюдателей, находящихся в движении относительно друг друга. Встав на точку зрения старых представлений, рассмотрим предварительно знаменитый опыт Майкельсона и Морлея, предназначенный для сравнения этих скоростей распространения света.

Так как наши прямые способы измерения времени несовершенны, то мы, конечно, не сможем сравнить между собой промежутки времени, которые необходимы свету, чтобы пробежать один и тот же путь в двух противоположных направлениях AB и BA. Чтобы измерить скорость света, необходимо — при помощи отражения — вернуть световое возмущение к его исходной точке и измерить время, которое отделяет испускание от возвращения; с еще большей точностью, применяя интерференцию, можно сравнить время, необходимое для прохождения светом пути туда и обратно в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Рассуждение I. Прежде всего, предположим, что опыт производится наблюдателями, считающими, что свет распространяется с одинаковой скоростью по всем направлениям, и будем рассуждать в системе координат, связанной с этими наблюдателями и их аппаратурой. На горизонтальной платформе находится источник света S, излучение которого падает на стеклянную пластинку O, наклоненную на 45°: одна часть падающего света отражается к зеркалу M, возвращается на пластинку O, проходит через нее и попадает затем в окуляр L; другая часть излучения прошла через пластинку O, отразилась от зеркала N и, возвратившись в O, отражается от него, совпадая затем в окуляре L с первым лучом и интерферируя с ним. Таким образом, создав явление интерференции, видимое в поле зрения окуляра L, по виду этого явления можно узнать, равны ли между собой отрезки времени, необходимые для прохождения света туда и обратно вдоль OM и ON. Если эти отрезки времени одинаковы, то световые возмущения, принесенные в фокус окуляра обоими лучами, должны совпасть, и мы получим максимум световой интенсивности в этой точке. Если свет распространяется с той же скоростью V во всех четырех направлениях OM, MO, ON, NO, то оба промежутка времени, необходимые для прохождения пути туда и обратно (см. рис. 4), равны соответственно:

$$\frac{2ON}{V} \text{ и } \frac{2OM}{V}.$$

Если прибор отрегулирован так, что дает картину интерференции, соответствующую равенству отрезков времени, то мы можем заключить, что OM равняется ON, и в таком случае вид полос интерференции должен остаться одним и тем же для любого вращения платформы, в особенности, когда поворот на 90° взаимно меняет направления OM и ON. И наоборот, неизменяемость вида оптического явления во время вращения показывает эквивалентность различных направлений с точки зрения распространения света. Примечательно, что этот опыт, — реализованный Майкельсоном и Морлеем настолько точно, что можно было бы открыть разницу порядка одной миллиардной между двумя промежутками времени распространения света, — всегда давал абсолютно отрицательный результат с точки зрения влияния ориентации платформы на вид интерференционных полос в поле зрения окуляра.

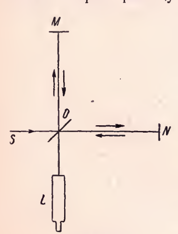

Рис. 4.

Этот результат находится в противоречии с обычными концепциями пространства и времени, если мы сохраняем волновую теорию в оптике.

Рассуждение II. Возьмем некоторое первоначальное положение Земли, для которого опыт показал, что свет распространяется одинаковым образом во всех направлениях, и изучим, с точки зрения системы координат, связанной с Землей в этот момент ее движения, наблюдение, сделанное шесть месяцев спустя наблюдателями O', которые движутся по отношению к первым наблюдателям O со скоростью v, равной 60 *км/сек*. Предположим, прежде всего, что наш прибор установлен таким образом, что направление ON параллельно скорости v. Источник света S движется по отношению к наблюдателям O. Согласно волновой теории, испускаемый источником свет должен распространяться независимо от движения самого источника, т. е. для наблюдателей O всегда с одной и той же скоростью V во всех направлениях. Когда свет, переданный через пластинку O, распространяется по направлению к зеркалу N, это зеркало, для наблюдателей O, «убегает» от света со скоростью v. Следовательно, чтобы достигнуть зеркала, свет, распространяющийся со скоростью V, затратит время

$$\frac{ON}{V-v}.$$

На обратном пути пластинка O «бежит» навстречу свету со скоростью v. Длительность этого пути, следовательно, составит $\frac{ON}{V+v}$ и общее время для прохождения пути туда и обратно будет:

$$t_1 = \frac{ON}{V-v} + \frac{ON}{V+v} = ON\,\frac{2v}{V^2-v^2}.$$

Свет, отраженный от пластинки O к зеркалу M, при своем возвращении встретит пластинку O несколько смещенной и должен будет обежать две стороны треугольника OM_1O_1, высота которого равняется OM. Так как отрезки пути OM_1O_1 и OO_1 проходятся в течение одного и того же отрезка времени: первый — светом со скоростью V, а второй — пластинкой O со скоростью v, то это время равняется

$$t_2 = \frac{OO_1}{v} = \frac{2OM_1}{V} = \frac{2OM}{\sqrt{V^2-v^2}}.$$

Если прибор отрегулирован так, что дает полосы интерференции, соответствующие равенству промежутков времени, то мы должны получить $t_1 = t_2$, откуда

$$\frac{ON}{OM} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}.$$

Предположим теперь, что мы повернули платформу на 90°; расстояния ON и OM меняются своими направлениями. В таком случае время прохождения пути туда и обратно в направлении скорости v становится:

$$t_1' = OM\,\frac{2V}{V^2-v^2},$$

и в перпендикулярном направлении:

$$t_2' = \frac{2ON}{\sqrt{V^2-v^2}}.$$

Отношение между этими временами равно:

$$\frac{t_2'}{t_1'} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}} \cdot \frac{ON}{OM} = 1 - \frac{v^2}{V^2}.$$

Следовательно, время распространения света должно быть неодинаково: относительное отклонение равно квадрату отношения скорости v к скорости света.

Принимая во внимание, что $v=60$ *км/сек* и $V=300\,000$ *км/сек*, найдем, что это отклонение равно $\frac{1}{25\,000\,000}$ или 40-миллиардных, т. е. точность наших измерений будет вполне достаточной, чтобы

обнаружить отклонение, если оно существует. Следовало бы ожидать, что если равенство промежутков времени, необходимых для пробега света, осуществленное в первой позиции платформы, перестает существовать, когда ее поворачивают, то картина интерференции, видимая через окуляр, должна была бы изменяться по мере того, как платформа вращается (см. рис. 5).

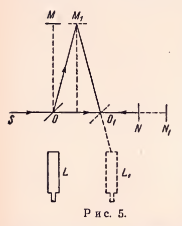

Рис. 5.

В противовес этому предположению, опыт всегда дает абсолютно отрицательный результат. Таким образом, можно утверждать, что объединение волновой теории в оптике с теорией вселенной, управляемой законами группы Галилея, находится в противоречии с опытом. Для того чтобы обнаружить движение системы в целом при помощи опытов, производимых внутри этой системы, использовались, кроме распространения света, и другие явления. Электромагнитные явления, отличные от оптических, представляющих собой отдельную отрасль первых, привели к аналогичным результатам, которые можно было бы разобрать так же, как мы это сделали для опыта Майкельсона и Морлея.

* * *

Чтобы объяснить отрицательный результат этого опыта, Лоренц и Фицджеральд выдвинули следующее предположение, противоречащее понятиям пространства и времени, требуемым механикой: движущаяся платформа представляется наблюдателям, которые ее видят проходящей со скоростью v, сокращенной по направлению движения в отношении $\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}$, таким образом, что она им кажется изменяющей свою форму, когда ее поворачивают на 90°, чтобы перевести из первого положения во второе. В рассуждении, которое привело нас к предположению об изменении картины интерференции в результате этого вращения, мы обозначили через ON и OM расстояния от пластинки до двух зеркал, и эти расстояния рассматривались нами как неизменные во время вращения. Если считать, что они могут изменяться и сделаться соответственно ON' и OM', то для второго положения мы получим:

$$\frac{t'_2}{t'_1}=\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}\cdot\frac{ON'}{OM'}.$$

И тогда гипотеза Лоренца приводит нас к следующим отношениям: расстояние OM, первоначально перпендикулярное к направлению движения, должно сократиться во время вращения и сделаться:

$$OM' = OM\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}.$$

И наоборот, расстояние ON, первоначально параллельное направлению движения, должно во время вращения удлиниться на эту же величину и сделаться:

$$ON' = \frac{ON}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}},$$

откуда путем деления получим:

$$\frac{ON'}{OM'} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{V^2}} \cdot \frac{ON}{OM}$$

и

$$\frac{t_2'}{t_1'} = \frac{ON}{OM} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}} = \frac{t_1}{t_2}.$$

Таким образом, равенство t_1 и t_2 обуславливает равенство t_1' и t_2'. Вид полос интерференции, в соответствии с результатом опытов, должен оставаться неизменным в течение всего времени вращения. Можно показать, что эта же гипотеза сокращения достаточна для объяснения отрицательного результата и других электромагнитных опытов.

Выясним, почему эта гипотеза находится в противоречии с концепцией вселенной в механике.

Эта концепция требует, чтобы все твердые тела изменяли свою форму для наблюдателей, которые видят их движущимися со скоростью v тогда, когда их ориентация меняется. Наоборот, для наблюдателей, связанных с этими телами, их форма должна остаться неизменной, потому что те линейки, которыми они могли бы пользоваться для измерения размеров тела, будучи связаны с этим телом, должны были бы, для первых наблюдателей, подвергнуться тому же сокращению. Отсюда следует вывод, что форма твердого тела должна быть различной для наблюдателей, которые с ним связаны, и для тех, которые по отношению к нему находятся в движении. Это противоречит сделанному выше замечанию относительно пространства в его обычном понимании.

К рассуждению, которое мы привели по поводу оптического опыта, ставя себя в положение наблюдателей, видящих прохождение платформы, могут прибегнуть и наблюдатели, связанные с этой платформой, если они будут рассматривать себя находящимися в движении со скоростью v по отношению к среде, передающей свет или электромагнитные действия, и если они предполагают использовать этот опыт как средство для обнаружения движения; именно эта точка зрения была принята прежде всего. Отрицательный результат первого опыта мог означать, что в этот особый момент Земля случайно была неподвижна в эфире. Однако шесть месяцев спустя она, несомненно, должна была двигаться относительно среды со скоростью 60 *км/сек*; все же в этот момент опыт всегда оставался отрицательным. Гипотеза сокращения тел, предназначенная для объяснения этого результата, возникла сначала в такой форме, что тело, движущееся относительно эфира, сокращается в направлении скорости в отношении:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}.$$

Согласно Эйнштейну, эта точка зрения имеет то неудобство, что вместе с идеей эфира она вводит идею особой системы координат, неподвижной относительно эфира. Однако опыт показывает, что ничто не отличает различные системы координат, находящиеся в равномерном и прямолинейном движении относительно друг друга и связанные с Землей в ее последовательных положениях на орбите. Эйнштейн изложил непосредственно и просто смысл экспериментальных фактов, провозгласив, в общей форме, принцип относительности, рассмотренный нами выше. Становясь на точку зрения оптических явлений, можно сказать: *если различные группы наблюдателей движутся равномерно и прямолинейно одни по отношению к другим, то явления происходят для всех их одинаковым образом; каждый из наблюдателей может рассматривать себя неподвижным по отношению к среде, передающей свет, и для него все происходит так, как если бы свет распространялся во все стороны с одной и той же скоростью.*

Это подтверждается нашим предыдущим рассуждением; оно показывает, что форма тела не может быть одной и той же для наблюдателей, которые с ним связаны, и для тех, которые видят его проносящимся мимо, и что для последних это тело должно казаться сжатым в направлении скорости в отношении:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}.$$

Пусть O — наблюдатели, связанные с Землей в ее первом положении; тогда O' будут те наблюдатели, которые через шесть месяцев проделывают отрицательный опыт Майкельсона и Морлея. С точки зрения Эйнштейна, наблюдатели O' будут по поводу своего опыта применять рассуждение I, а наблюдатели O, принимающие рассуждение II, должны будут сделать заключение о сокращении Лоренца для системы, которая находится в движении по отношению к ним и на которой был произведен опыт.

Это сокращение Лоренца, несовместимое с обычными понятиями пространства и времени, сопровождается другими аналогичными отклонениями, имеющими одинаковую важность, — отклонениями от обычных представлений, к последовательному рассмотрению которых мы и переходим.

Но прежде всего следует показать другим способом, как экспериментальные факты приводят к необходимости пересмотра преобразований группы Галилея и тех понятий пространства и времени, которые им соответствуют. Как показывают эти факты, законы физических явлений одни и те же для различных групп наблюдателей, находящихся в равномерном и прямолинейном движении относительно друг друга, и, следовательно, уравнения, выражающие эти законы, должны представляться в одной и той же форме для всех этих групп. Когда одно и то же явление изучается одновременно (как мы только что видели в случае с опытом Майкельсона и Морлея) двумя группами наблюдателей, O и O', то измерения различных величин — расстояний в пространстве, интервалов во времени, величин механических, электромагнитных, оптических и т. д., — произведенные наблюдателями O, должны выражаться как функции измерений, сделанных наблюдателями O', и параметров, определяющих относительное движение обеих групп; при этом необходимо, чтобы эти выражения, подставленные в уравнения, выражающие законы такими, какими они представляются наблюдателям O, сохраняли для последних свою форму как функции измерений, сделанных наблюдателями O'.

Итак, трансформации, позволяющие переходить от одной системы к другой, должны оставлять инвариантной форму законов физики, подобно тому как трансформация группы Галилея и связанные с нею трансформации масс и силы оставляют инвариантными уравнения механики. Однако мы совершенно точно знаем законы, управляющие электромагнитными явлениями. Эти законы выражены уравнениями Максвелла и Герца; и когда их применяют к теории света, они приводят к представлению о распространении света в полном соответствии с волновой теорией. Уравнение распространения света содержит постоянный коэфициент — скорость V, одинаковую для всех направлений; и если это уравнение должно быть подтверждено, как указывает

принцип относительности, всеми группами наблюдателей, то последние, при условии, что они сделают подходящий выбор единиц измерений, увидят, что свет распространяется во всех направлениях с одной и той же скоростью V.

Более того, уравнения электромагнетизма, как это открыл Лоренц, допускают, действительно, группу преобразований, которая сохраняет их форму; эта группа — во всем том, что касается изменений пространства и времени, — глубоко отличается от группы Галилея, которая должна рассматриваться как первое приближение к группе Лоренца. При этом следует учесть, что опыты в области механики обычно проводятся с значительно меньшей точностью, чем опыты в области электромагнетизма и оптики.

Другими словами, опыты в области механики обладают слишком малой точностью, чтобы можно было утверждать, что законы движения материи допускают, сохраняя свою форму, скорее группу Галилея, чем новую группу, открытую Лоренцем. И наоборот, опыты в области электромагнетизма и оптики являются теперь достаточно точными, чтобы полностью подтвердить теорию Максвелла и с полной уверенностью устранить группу Галилея.

Открытие группы Лоренца показало, правда, с значительным запозданием, что уравнения электромагнетизма, в том виде, в каком их без всякой предвзятости установили Максвелл, Герц и Лоренц, содержали объяснение именно отрицательного результата новейших опытов.

Чтобы изучить ту часть группы Лоренца, которая соответствует трансформациям пространства и времени, достаточно допустить как следствие экспериментальных фактов и принципа относительности, который их выражает, что свет распространяется для всех групп наблюдателей во всех направлениях с одной и той же скоростью V. Из этого мы вывели необходимость сокращения Лоренца, т. е. изменения формы тела в зависимости от движения наблюдателей. Чтобы уточнить это изменение, группе Лоренца можно дать определение, аналогичное определению группы в геометрии, предназначенному сохранить форму для выражения расстояния двух точек. Поскольку пространство и время появляются здесь одновременно, то наше рассуждение следует вести о событиях.

В качестве первого события возьмем испускание светового сигнала, которое — с точки зрения его расположения в пространстве и во времени — наблюдатели O определили четырьмя координатами: x_0, y_0, z_0, t_0, а наблюдатели O', находящиеся в равномерном и прямолинейном движении по отношению к первым, — координатами x'_0, y'_0, z'_0, t'_0. Второе событие — прибытие этого светового сигнала в какой-либо приемный аппарат и его

восприятие группами наблюдателей O и O'. Для наблюдателей O расстояние, которое пробежал свет, равно:

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2.$$

Поскольку это расстояние пройдено светом в течение времени $t-t_0$ и поскольку свет для наблюдателей O распространяется с одинаковой скоростью V во всех направлениях, мы получаем для пары рассматриваемых событий

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2-V^2(t-t_0)^2=0.$$

Далее, поскольку свет распространяется со скоростью V во всех направлениях также и для наблюдателей O', мы должны иметь в то же время:

$$(x'-x_0')^2+(y'-y_0')^2+(z'-z_0')^2-V^2(t'-t_0')^2=0.$$

Чтобы из нулевого значения первого выражения с необходимостью вытекало нулевое значение второго выражения, необходимо, чтобы формулы трансформации, — позволяющие выражать составляющие расстояния в пространстве и интервал во времени двух событий для наблюдателей O в функциях этих же элементов, измеренных наблюдателями O', — обладали способностью оставлять инвариантным выражение:

$$R=(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2-V^2(t-t_0)^2=$$
$$=d^2-V^2(t-t_0)^2,$$

причем x_0, y_0, z_0, t_0, x, y, z, t соответствуют здесь двум какимлибо данным событиям. Количество R, значение которого одно и то же для всех групп наблюдателей, играет во вселенной Минковского роль, аналогичную расстоянию между двумя точками в геометрии. Группа Лоренца определяется условием инвариантности этого количества.

В случае, когда две системы осей имеют одинаковую направленность и когда их относительное движение совершается вдоль осей x со скоростью v, трансформация пространства и времени определяется следующими уравнениями, где β представляет собой отношение $\frac{v}{V}$ — скорости относительного движения к скорости света:

$$x-x_0=\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left[(x'-x_0')+v(t'-t_0')\right],$$
$$y-y_0=y'-y_0',$$
$$z-z_0=z'-z_0',$$
$$t-t_0=\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left[t'-t_0'-\frac{\beta}{V}(x'-x_0')\right].$$

В случае же, когда предполагают, что первое событие избрано в качестве исходной точки одновременно двумя группами наблюдателей, эти уравнения принимают простой вид:

$$x = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x' + vt'),$$

$$y = y',$$

$$z = z',$$

$$t = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t' - \frac{\beta}{V}x'\right).$$

Заметим, впрочем, что эта группа совпадает с группой Галилея, если в ней предположить бесконечной скорость распространения света V, потому что тогда β сделается равным нулю для любой скорости v. Поскольку скорость света V действительно чрезвычайно велика сравнительно со скоростями v, могущими быть наблюдаемыми на опыте (максимум 50 *км/сек*) *, то β всегда очень мало, и, следовательно, группа Галилея является для группы Лоренца первым приближением, обычно вполне достаточным, за исключением таких очень тонких опытов, как опыты Майкельсона и Морлея.

Из приведенных уравнений мы непосредственно получаем сокращение Лоренца в точной форме. Предположим, что какой-нибудь предмет неподвижен по отношению к наблюдателям O и что x_0, y_0, z_0 и x, y, z являются для этих наблюдателей координатами двух точек A и B этого объекта. Тогда наблюдатели O', чтобы изучить форму этого предмета, который по отношению к ним будет находиться в движении, должны будут рассматривать одновременные положения двух различных точек предмета — в частности, два одновременных положения материальных точек A и B, т. е. два одновременных события, образованных присутствием этих материальных точек в один и тот же момент, обозначенный ими через $t' = t_0'$.

Расстояние между точками A и B будет для наблюдателей O' расстоянием в пространстве двух событий, и этому будут соответствовать выражения, которые получаются, подставляя в предыдущие уравнения

$$t' - t_0' = 0,$$

---

* Скорости движения микрочастиц, наблюдаемые и точно измеряемые в настоящее время, достигают значений, очень близко подходящих к величине скорости света (до 95% и более). — *Прим. ред.*

откуда

$$x' - x_0' = (x - x_0)\sqrt{1-\beta^2},$$

$$y' - y_0' = y - y_0,$$

$$z' - z_0' = z - z_0.$$

Следовательно, предмет будет иметь одни и те же размеры для двух групп наблюдателей в направлении осей y и z, перпендикулярных движению; напротив, в направлении движения этот предмет будет более коротким для наблюдателей O', которые видят его движущимся мимо них, чем для наблюдателей O, для которых он неподвижен. Это сокращение Лоренца определяется величиной $\sqrt{1-\beta^2}$.

Кроме того, замечательно, что это сокращение обоюдное, так как, с точки зрения принципа относительности, наблюдатели O ничем не отличаются от наблюдателей O', и предмет, неподвижный по отношению к наблюдателям O', будет представляться сокращенным для наблюдателей O. Если, например, каждая из групп наблюдателей держит линейку и если эти линейки представляются им равными при прохождении, когда они их держат в направлении, перпендикулярном движению, то, напротив, когда эти линейки держатся параллельно направлению относительного движения, каждая из групп увидит при прохождении, что линейка другой группы более коротка, чем линейка их собственной группы.

Для того чтобы понять, что это именно так, нужно обратить внимание на второй парадоксальный аспект трансформации Лоренца, а именно — на тот факт, что одновременность не имеет уже другого смысла, кроме смысла относительного, в противовес основной гипотезе группы Галилея; два события, одновременные для одной из групп наблюдателей, не являются таковыми для другой, за исключением того случая, когда совпадение во времени сопровождается одновременным совпадением в пространстве. Действительно, последняя из формул трансформации дает нам для двух одновременных событий с точки зрения наблюдателей O', т. е. для $t' - t_0' = 0$,

$$t - t_0 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot \frac{\beta}{V}(x_0' - x').$$

Следовательно, два события не являются одновременными для обоих наблюдателей O и O', если только x' не равняется x_0'.

Сказанное нетрудно понять, если принять во внимание, что для наблюдателей O' длина линейки, которую держат наблюдатели O, является расстоянием между двумя одновременными

положениями (с точки зрения O') обоих концов этой линейки; в то же время длина линейки наблюдателей O', измеренная наблюдателями O, равняется расстоянию между двумя положениями концов этой линейки, одновременными с точки зрения O. Поскольку два определения одновременности не совпадают, нетрудно понять, что линейка, которую держат наблюдатели O, может оказаться для них более длинной, чем линейка наблюдателей O', и наоборот.

Чтобы понять, почему принцип относительности, согласно которому свет распространяется во всех направлениях с одной и той же скоростью для всех групп наблюдателей, находящихся в равномерном и прямолинейном движении, приводит к необходимости пересмотра понятия одновременности и оставляет за этим понятием только относительный смысл, возьмем следующий пример. Представим себе появление искры в аппарате, неподвижном по отношению к наблюдателю O', и возьмем это событие за исходное в двух системах O и O'. Для наблюдателей O световая волна, испущенная искрой, будет находиться по истечении одной секунды в сфере радиуса V с центром в той точке, где для этих наблюдателей находился аппарат в момент испускания. В результате своего движения этот аппарат по истечении одной секунды переместится для наблюдателей O в некоторую точку O', расположенную на расстоянии OO' от центра волны, равному v. Если приемные аппараты расположены в точках M и N, то прибытие волны в оба аппарата окажется для наблюдателей O одновременным событием. Для наблюдателей O', по отношению к которым аппарат, испускающий свет, неподвижен и для которых свет распространяется также с одинаковой скоростью во всех направлениях, свет, чтобы дойти до приемника N, должен был бы затратить меньше времени, чем для того, чтобы дойти до приемника M. Это значит, что эти два прибытия, одновременные для наблюдателей O, не будут таковыми для наблюдателей O' (см. рис. 6).

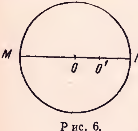

Рис. 6.

Этот относительный характер одновременности восстанавливает между пространством и временем симметрию, которой в обычных концепциях не существует. Мы видели, что, с точки зрения группы Галилея, только расстояние в пространстве двух событий имеет относительный характер и изменяется с изменением системы отсчета, в то время как их интервал во времени имеет абсолютный характер. Наоборот, в концепции, совместимой с группой Лоренца, изменение системы отсчета соответ-

ствует одновременно изменению расстояния в пространстве и интервала во времени для двух событий.

Порядок последовательности может сделаться обратным для двух данных событий, если соответственно изменяется движение людей, наблюдающих эти события. Например, введем в предыдущем случае третью группу наблюдателей O'', находящихся в движении по отношению к наблюдателям O в направлении, противоположном наблюдателям O'. Для наблюдателей O'' испущенная световая волна имеет центр в точке, неподвижной по отношению к ним, так как свет и для них распространяется с одной и той же скоростью во всех направлениях, и эта точка смещается, начиная с момента испускания, влево от точки O; таким образом, для наблюдателей O'' прибытие света в приемник M будет предшествовать прибытию его в приемник N, между тем как оно является *последующим* для наблюдателей O' и *одновременным* для наблюдателей O.

В предыдущих наших рассуждениях одновременность событий, происходящих в разных точках, определяется для некоторой группы наблюдателей при помощи обмена световыми сигналами. Возникает вопрос, нет ли других способов для определения одновременности, например способа, дающего указания, соответствующие гипотезе абсолютного времени, в виде сигнала, который мог бы быть произведен посредством идеально твердого тела, рассматриваемого в рациональной механике, тела, которое могло бы быть приведено в движение *одновременно* во всех его точках. В таком случае можно было бы ускользнуть от парадоксальных заключений, приведенных нами выше, но эта лазейка оказалась бы в противоречии с принципом относительности, потому что, как легко убедиться, сравнение измерений времени, даваемых оптическими и мгновенными сигналами, позволило бы экспериментально обнаружить движение системы при помощи экспериментов, произведенных внутри самой этой системы. В частности, законы электромагнитных явлений оказались бы неодинаковыми для различных групп наблюдателей, находящихся в движении одни по отношению к другим, в том случае, если бы можно было иметь измерение времени, которое не совпадало бы с измерением, выводимым из этих же явлений. Действительно, эти законы сохраняют свою форму только для трансформаций группы Лоренца. Следовательно, с точки зрения принципа относительности, необходимо, чтобы все механические, электрические, оптические, химические и биологические процессы, использованные для измерения и сравнения времен, всегда приводили бы к совпадающим результатам, причем в такой мере, в какой принцип относительности рассматривается как имеющий силу для явлений этих категорий.

Заметим, впрочем, что перемена порядка последовательности во времени возможна не для всех пар событий и может происходить только для особой категории пар событий, характеризуемых тем условием, что расстояние в пространстве двух событий должно быть бо̀льшим, чем путь, который пробегает свет в течение их интервала во времени. Это условие, очевидно, выполняется для распространения света до точек M и N в предыдущем опыте, так как для наблюдателей O расстояние в пространстве двух событий равняется $2v$, а их интервал во времени равен нулю. Легко понять, что если это условие выполнено для одной группы наблюдателей, оно выполняется и для всех других групп. Так, если d — расстояние в пространстве двух событий, а $t - t_0$ — их интервал во времени для частной группы наблюдателей, то это условие может быть выражено:

$$d^2 > V^2(t - t_0)^2,$$

откуда вытекает, что величина R, согласно уравнению (1), положительна и, поскольку она инвариантна, сохраняет свое значение и свой знак для всех групп наблюдателей; следовательно, условие выполнено по отношению ко всем группам.

Чтобы показать, что это условие необходимо, заметим, что если порядок последовательности двух событий может быть обращен, когда переходят от одной системы координат к другой, то существует, безусловно, и такая система координат, по отношению к которой два события окажутся одновременными (наблюдатели O в предыдущем эксперименте), причем количество R сводится и для них к квадрату расстояния, т. е. является, по существу, положительным. Для двух событий этого рода мы имеем:

$$d^2 = R + V^2(t - t_0)^2;$$

и поскольку инвариант R один и тот же для всех групп наблюдателей, то из этого вытекает, что расстояние в пространстве между двумя событиями этого рода является наименьшим для наблюдателей, которые видят их одновременными. Именно в этом и заключается наиболее глубокий смысл сокращения Лоренца. Длина линейки, будучи расстоянием в пространстве двух одновременных положений концов этой линейки, для наблюдателей, которые видят ее движущейся мимо них, представляется более короткой, чем наблюдателям, связанным с линейкой, для которых эти события не одновременны.

Допуская, что два события, порядок последовательности которых может быть обращен, не могут быть связаны какой-либо причинностью, я пришел к выводу, что причинность не может распространяться с большей скоростью, чем скорость света. Если бы тот или иной вид причинности не удовлетворял указанному

условию, это опровергло бы принцип относительности и позволило сравнить времена, при которых свет больше не распространялся бы одинаково по отношению ко всем группам наблюдателей. Таким образом, при помощи опытов, произведенных внутри тела, можно было бы обнаружить движение этого тела по отношению к среде, переносящей свет.

Можно утверждать, что из всех известных в настоящее время способов действия ни один не противоречит этому условию. Опыт показывает, что ни один сигнал не перемещается по отношению к какой-либо системе со скоростью, превышающей скорость света. Замечательно, в частности, что β-частицы, испускаемые радиоактивными телами, имеют измеренные опытным путем скорости, которые, хотя и сильно приближаются к скорости света, достигая иногда 99 процентов этой скорости, остаются все-таки ниже ее.

Заметим также, что обращение порядка последовательности событий никогда не может произойти для двух событий, следующих друг за другом в одной и той же части материи. Этот порядок остается неизменным, каким бы ни было движение наблюдателей. Действительно, для наблюдателей, которые так или иначе связаны с этой частью материи, скажем встречаются с ней, последовательно присутствуя при двух событиях, оба эти события, если движение данной части материи в интервале было не равномерным, совпадают в пространстве, т. е. d^2 равно нулю, и, следовательно, R — отрицательно. Поскольку эта величина инвариантна, интервал во времени не может аннулироваться ни для кого, потому что отрицательное количество R в таком случае должно было бы быть равным квадрату расстояния. Таким образом, если в данном случае нельзя достигнуть одновременности двух событий, то в еще большей мере это относится к достижению обращения порядка последовательности событий.

Два указанных события принадлежат к новой категории пар и притом таких, для которых инвариант R — отрицательный, т. е. расстояние между которыми в пространстве меньше пути, пробегаемого светом в течение их интервала во времени. События такой пары могут эффективно действовать одно на другое, так как — по крайней мере, при посредстве световых волн — условия, в которых происходит второе событие, могут быть изменены уже тем фактом, что до него произошло первое событие; это — принцип телеграфии.

Например, если оба указанных нами события последовательно происходят в одной и той же части материи, то второе событие по необходимости обусловливается первым, и было бы абсурдным, чтобы их порядок последовательности мог быть обращен для наблюдателей, находящихся в соответственно выбранном движении. Симметрия между свойствами пространства

и времени дополняется свойством рассматриваемых нами пар событий, представляющем собой для времени аналог того, чем является для пространства сокращение Лоренца.

Назовем «собственным временем» некоторой части материи для наблюдателей, связанных с этой частью материи, интервал времени между двумя событиями, следующими одно за другим и совпадающими в пространстве для этих наблюдателей. Для каждой другой группы наблюдателей, для каждой другой системы отсчета, по отношению к которой эта часть материи движется, интервал времени между указанными двумя событиями будет бо̀льшим, чем «собственное время», подобно тому как расстояние в пространстве между двумя событиями, относящимися к первой категории ($R > 0$), больше для любых наблюдателей, которым события представляются неодновременными, чем для тех, которым они кажутся одновременными.

Действительно, для пары событий второй категории величина R отрицательна, и мы имеем:

$$V^2 (t - t_0)^2 = d^2 - R,$$

где R — инвариант, $t - t_0$ — минимум для наблюдателей, по отношению к которым d равно нулю, т. е. оба события совпадают в пространстве. Это минимальное значение будет для обоих событий измерять интервал «собственного времени» той части материи, в которой они следуют друг за другом, т. е. в системе координат, для которой они совпадают в пространстве. Для всех прочих систем координат интервал во времени будет большим, и это еще раз показывает, что никакая обратимость в порядке последовательности событий невозможна.

Существование «собственного времени» позволило мне заключить, что если какая-либо материальная система движется, следуя по замкнутому пути с достаточно большой скоростью по отношению к наблюдателям O, находящимся в равномерном и прямолинейном движении, то «собственное время», которое уйдет на то, чтобы эта система прошла путь туда и обратно, будет меньше, чем измеренный наблюдателями O интервал между отбытием и прибытием системы.

Это заключение верно в такой же мере, в какой мы можем утверждать, что законы естественных явлений должны оставаться инвариантными для трансформаций группы Лоренца. В пользу этого свидетельствуют все приложенные до сих пор наиболее значительные экспериментальные усилия. Возможно, что новые опыты заставят нас отказаться от группы Лоренца, как мы сделали это в отношении группы Галилея; возможно, что в поисках синтеза, охватывающего явления тяготения, до сих пор не повинующиеся электромагнитной теории, мы пополним наше знание о пространстве и времени, но, повидимому, эти изменения, если

они даже и произойдут, будут направлены не в сторону возвращения к абсолютному пространству и абсолютному времени.

Известно, что в целях ясной и полной передачи инвариантности законов по отношению к системам координат в геометрии и механике создан такой язык, который подтверждает существование новой и более высокой реальности. Подобно этому, общий принцип относительности приводит нас к поискам формы выражения законов вселенной, вводящей в них лишь инвариантные величины — величины, измеренные одинаково всеми группами наблюдателей.

Среди величин, известных нам из прошлого, лишь немногие удовлетворяют этому условию: только электрический заряд, давление, энтропия и действие (произведение энергии на время) могут составить элементы, годные для нового языка вселенной. Подобно тому, как в механике были введены векторные понятия, такие как «сила» и «пара сил», физикам придется ввести новые инвариантные элементы, которые позволили бы придать законам физики общую и простую форму, обусловленную существованием принципа относительности. Одним элементом этого рода, по значению аналогичным расстоянию в геометрии, является величина R, которая характеризует каждую пару событий и знак которой определяет решение вопроса — могут ли события влиять одно на другое, или же не могут, могут ли они быть приведены к совпадению во времени или пространстве при помощи выбора соответствующей системы координат.

ЗЕРНА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДИНАМИКА*

Мне хочется напомнить вам о том, какие успехи были достигнуты в понимании электромагнитных и оптических явлений за последние 15 лет благодаря открытию корпускулярной структуры электричества.

Истекший период исключительно богат открытиями в области физики.

Настоящий момент является наиболее подходящим, чтобы дать общий обзор, так как в ближайшее время мы будем вынуждены внести значительные изменения в существующие концепции.

Но если идеи должны непрерывно развиваться, ибо без этого они не смогут жить и приспосабливаться к фактам, то открытые при помощи современной теории замечательные взаимосвязи между явлениями, на первый взгляд кажущимися совершенно различными, не исчезнут, а будут постоянно способствовать развитию нашей науки.

История развития электрических теорий до конца XIX в. охватывает два крупных периода.

В первый период, для характеристики которого достаточно привести имя Кулона, господствующей была теория о том, что электрические заряды действуют друг на друга на расстоянии, аналогично массам в теории тяготения.

Начало второго периода было положено Фарадеем; не признавая возможности непосредственного действия на расстоянии, он обратил внимание на среду, через которую передаются эти действия, и нашел, что силы, действующие на наэлектризованное тело, определяются состоянием окружающей его среды. Понятие интенсивности поля определенной направленной величины сделалось основным понятием, характеризующим состояние среды в каждой данной точке, или — по первоначальной формулировке Фарадея — состояние силовых линий или трубок, проходящих через среду и прикрепленных к наэлектризованным телам. Фарадей объясняет электрические явления, и в частности свойства материальных диэлектриков, наличием силовых трубок,

* Доклад, представленный Французскому физическому обществу в 1912 г. — *Прим. ред.*

несущих на своих концах одинаковые электрические заряды противоположных знаков. Силовые трубки действуют на заряды с различной силой, в зависимости от состояния изолирующей среды, через которую трубки проходят и которая в свою очередь претерпевает изменения от их присутствия. Электрический заряд является в данном случае уже второстепенным понятием: количество электричества, несомое телом, определяется числом силовых трубок, идущих от этого тела.

Максвелл, выразивший идеи Фарадея в математической форме, заменил неясную формулировку о числе силовых трубок более точным понятием потока индукции через поверхность; при этом он указал, что индукция является определенно направленной величиной, строго пропорциональной силе поля, с коэфициентом, изменяющимся в зависимости от природы среды.

Электрический заряд, находящийся внутри замкнутой поверхности, имеет, по теории Максвелла, лишь математическое определение: величина, пропорциональная потоку индукции, выходящему из этой поверхности.

Концепция же электрического флюида, наоборот, придавала понятию об электрическом заряде более конкретное воплощение.

Физики второй половины XIX в. оставили этот вопрос без внимания вследствие появления общих тенденций энергетического периода, возникших после того, как выяснилась полная несостоятельность теории тепловых и световых жидкостей.

Однако, если теплота, рассматриваемая как флюид, не сохраняется *, то совершенно иначе обстоит дело с электричеством. Слишком общее и крайнее отрицание флюидов было необоснованным; достижения последнего периода, о которых я буду говорить ниже, в известной степени вернули нас к прежним идеям.

Это возвращение было оплодотворено этапом развития физики, связанным с именами Фарадея, Максвелла и Герца, которые раскрыли сущность передачи электрических действий и показали, что эта передача происходит не мгновенно, как предполагал Кулон, а со скоростью распространения света.

Указанное возвращение к прежним идеям явилось следствием открытия зернистого строения электрического заряда и доказательства существования атома электричества, который всегда и везде остается тождественным самому себе.

Таким образом, после некоторого периода сомнений понятие о заряде вновь приобрело реальный физический характер, который был им утерян.

---

* То есть легко переходит в другие формы энергии. — *Прим. ред.*

I. ОПЫТЫ

Законы электролиза. В результате проведения ряда опытов учеными были открыты «зерна» электричества.

Гельмгольц первый обратил внимание на то, что простые законы электролиза, открытые Фарадеем, предполагают наличие атомной структуры электрических зарядов, поскольку допускается атомная структура материи.

Эти законы могут быть выражены в следующей форме: все одновалентные атомы или одновалентные радикалы переносят при электролизе один и тот же, по абсолютной величине, электрический заряд; двухвалентные, трехвалентные и т. д. атомы или радикалы переносят соответственно двойной, тройной и т. д. заряд.

Количество электричества, проходящее через электролит, состоит, следовательно, из элементов, равных между собой и независимых от химической природы несущего их вещества.

Каждое зерно материи при электролизе несет всегда целое, равное своей валентности, число положительных или отрицательных зерен электричества.

Поскольку один грамм-атом одновалентного иона всегда связан в электролизе с 96 540 кулонами, то, зная число атомов в одном грамм-атоме, иначе говоря — число Авогадро N, можно точно вычислить заряд e зерна электричества при электролизе; заряд атома определяется в электростатической системе единиц CGS при помощи соотношения:

$$Ne = 96540 \cdot 3 \cdot 10^9. \qquad (1)$$

Наличие разнообразных и все более точных методов дает возможность в настоящее время определить N: атомное строение материи, определяемое по ряду различных признаков, дает возможность установить величину и количество атомов. Если принять для N значение $68{,}5 \cdot 10^{22}$, согласно данным Перрена, то получится, что

$$e = 4{,}2 \cdot 10^{-10}$$

в электростатических единицах.

При определении N другими методами e всегда имеет величину, которая лежит между $4 \cdot 10^{-10}$ и $5 \cdot 10^{-10}$.

Газы-проводники. Исследования в области проводимости газов, ставшие возможными и более точными благодаря открытию лучей Рентгена и свойств радиоактивности, позволили изолировать и определить в отдельности атомы электричества, предсказанные Гельмгольцем; кроме того, было доказано, что структурный элемент положительных или отрицательных электрических зарядов при любых условиях равен по абсолютной величине заряду e, который при электролизе переносится одно-

валентным атомом или ионом. Газы при прохождении через них вышеуказанных лучей приобретают проводимость вследствие того, что лучи вызывают образование наэлектризованных центров или положительных и отрицательных ионов, перемещающихся в газе под влиянием поля.

Наличие этих ионов стало совершенно очевидным благодаря явлениям конденсации, наблюдаемым в проводящих газах.

Свойство проводимости, приобретенное газом, придает ему способность гораздо легче конденсировать пересыщенные водяные пары; конденсация в этом случае происходит в виде наэлектризованных капелек, причем можно измерить заряд каждой из них. Для этого нужно сравнить скорость падения капелек, происходящего как под влиянием только одной тяжести, так и при наличии вертикального электрического поля известной интенсивности.

Благодаря методу, разработанному Таунсендом и затем усовершенствованному последовательно Томсоном, Вильсоном и Милликеном, ученые установили прерывность структуры электрических зарядов в проводящем газе. Даже самый маленький заряд, находящийся на капле, остается всегда одним и тем же, т. е. точно соответствует предположениям, сделанным на основе законов электролиза (его величина заключается между 4 и $5 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц CGS). Кроме того, было установлено, что заряд одной и той же капельки изменялся прерывно, причем всегда на величину, кратную предыдущей.

Я не буду останавливаться на замечательных опытах, продемонстрированных Перреном *.

Таким образом, мы признаем несомненное существование зерен электричества и, кроме того, их тождественность в электролитах и в газах-проводниках.

Приведенное выше доказательство этой тождественности предусматривает знание числа Авогадро N, которое необходимо для вычисления e посредством отношения (1).

Благодаря замечательному приему Таунсенда это тождество может быть установлено непосредственно, без необходимости знать число Авогадро.

Действительно, чтобы установить отношение между зарядом зерна электричества в газах-проводниках и атомным зарядом в электролитах, достаточно сравнить подвижность ионов, находя-

* В этих опытах Перрен изучал законы распределения мелких частиц гуммигута, взвешенных в воде. Зная, как меняется количество таких частиц в единице объема с высотой (от дна сосуда), можно с большой точностью определить число Авогадро. Это число Перрен также определил из других своих опытов — по наблюдению за перемещением одной очень мелкой частицы, взвешенной в жидкости, движущейся хаотически под действием ударов неупорядоченного движения молекул жидкости. — *Прим. ред.*

щихся в газе, с их коэфициентом диффузии, — иначе говоря, сравнить скорость, с которой движущиеся заряды перемещаются в газе-проводнике под влиянием электрического поля, со скоростью постоянного диффундирования этих зарядов вследствие теплового движения, от проводящих областей к непроводящим.

Кинетическая теория предусматривает (и опыты это подтверждают), что при наличии электрического поля ионы определенного знака перемещаются в газе со скоростью, пропорциональной полю.

Коэфициент пропорциональности или подвижность рассматриваемых ионов, очевидно, изменяется, при всех равных условиях, как и заряд e', несомый ионом, т. е. как сила, действующая на ион в данном поле. С другой стороны, коэфициент диффузии определяется тепловым движением, т. е. средней кинетической энергией w иона, равной, по кинетической теории, энергии любой молекулы при той же температуре.

Отношение подвижности к коэфициенту диффузии, определенному опытным путем, дает возможность вычислить $\frac{e'}{w}$. Кинетическая теория, как известно, объясняет давление, производимое газами, тепловым движением их молекул и считает его пропорциональным произведению числа молекул на среднюю кинетическую энергию каждой из них.

Уравнение идеальных газов для одной грамм-молекулы может быть выражено в следующем виде:

$$pv = RT = \frac{2}{3} Nw.$$

Зная $\frac{e'}{w}$, можно определить произведение Ne' числа Авогадро на заряд одного иона в газе-проводнике, причем полученная величина почти во всех известных случаях совпадает с величиной этого произведения Ne, т. е. числа Авогадро на атомный заряд.

Таким образом, установлено, что зерно электричества одно и то же как в газах-проводниках, так и в электролитах. Вышеприведенное доказательство этого тождества очень важно: оно дает возможность заменить в отношении (1) атомный заряд e зарядом иона e', как его вычислили опытным путем непосредственно на капельках, и получить, таким образом, один из лучших методов определения числа Авогадро.

Испускание наэлектризованных частиц. В результате многочисленных опытов по определению условий, при которых материя испускает электрические заряды, было установлено наличие одной и той же структуры одного и того же зерна или элемента заряда, что и в двух предыдущих случаях.

Прежде всего известно, что под влиянием различных факторов — при искровом разряде, при действии светового или ультрафиолетового излучения или при повышении температуры — металлы могут испускать отрицательные заряды, т. е. катодные лучи. Когда эти лучи попадают в газ, который они заряжают отрицательно, последний приобретает, как и под действием лучей Рентгена, способность быстро конденсировать водяные пары, и для заряда капельки опыт всегда дает простое, целое кратное число того же элементарного заряда. Метод Таунсенда, примененный им к газам, получившим отрицательный заряд вследствие действия катодных лучей, показал, что эти лучи образованы частицами заряда, равного заряду одновалентного отрицательного иона при электролизе.

Несколько ниже мы увидим, каким образом применение общих законов электромагнетизма к катодным лучам дало возможность определить не только заряд, но и массу этих частиц. Как было установлено, эти частицы по своей массе неизмеримо меньше атомов и всегда тождественны между собой, каково бы ни было их происхождение; мы их назовем корпускулами или отрицательными электронами.

Эти катодные корпускулы являются, таким образом, как бы одной из основных структурных составляющих, общей для всех материальных атомов; их можно выделить из любого вещества и при самых различных условиях, в частности посредством искрового разряда или при накаливании добела. Изучение законов излучения света материей подтверждает наличие в ней катодных корпускул как составных частей всех материальных атомов, причем нет необходимости выделять их специально.

Метод непосредственного счета α-частиц, испускаемых радиоактивными телами, совершенно отличен от предыдущих методов и как бы дополняет их, так как он непосредственно дает N, вместо того чтобы определять e *, и показывает, что каждая положительная частица, из которых состоят α-лучи, несет удвоенный элементарный заряд. С другой стороны, применение электромагнитных измерений дало возможность вычислить массу α-частиц и показало, что эти частицы, вследствие потери ими двух отрицательных электронов, являющихся составными частями их нормальной структуры, тождественны с положительно заряженными атомами гелия.

* Непосредственный подсчет числа α-частиц производится путем счета сцинтилляций (вспышек света), производимых ими на определенном участке сферического сосуда, покрытого флюоресцирующим веществом, внутри которого помещен α-радиоактивный препарат. Затем полученное среднее число умножается на соответствующий коэфициент для получения полного числа испущенных α-частиц. Измеряя общий переносимый ими заряд, можно определить заряд одной α-частицы. — *Прим. ред.*

II. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ

Все вышеуказанные научные исследования, имевшие большую важность в момент их появления, еще большее значение приобрели с развитием электромагнитной теории, которая разрабатывалась в тот же период.

Я постараюсь изложить, каким образом и в каком объеме эта теория дает возможность связать между собой и понять огромное количество фактов. Я намерен остановиться, главным образом, на тех фактах, которые посредством сопоставления опытов с теорией дают новые сведения о присутствии в материи наэлектризованных центров и доказывают, что наличие их в материи обязательно. В основе этой теории лежат свойства эфира, открытые Максвеллом и Герцем в результате развития идей Фарадея о передаче электромагнитных действий на расстоянии.

После того как Фарадей обратил внимание на существенную роль среды, Максвелл, продолжив анализ, пришел к предположению, что электромагнитные действия передаются со скоростью света, а Герц опытным путем доказал правильность этого предположения. Это и явилось исходным пунктом электромагнитной теории света, не вызывающей в настоящее время никаких сомнений.

Однако трудности продолжали существовать, особенно в вопросе различия между обычной вещественной средой и пустотой. Законы, относящиеся к пустоте, эфиру, были очень просты: эта среда, всегда неизменная, отличалась лишь одной скоростью распространения V, равной 300 000 *км/сек*. Свойства обычной материи оказывались гораздо более сложными. Даже в наиболее простом случае изолирующих прозрачных сред было известно, что эти среды отличались не только между собой, но и от пустоты; кроме того, в каждой из них скорость распространения не была точно определена. Было установлено, что в одной и той же среде эта скорость изменялась в зависимости от природы возмущения, от частоты, если речь шла, например, о периодической волне. Теория Максвелла не могла объяснить этой дисперсии, а последняя как раз составляла существенное различие между веществом и эфиром.

Имея в виду эти трудности и стремясь объяснить электрические и оптические явления в движущихся телах, Лоренц развил гипотезу, согласно которой везде имеется одна и та же среда — эфир, как в межпланетном пространстве, так и внутри атомов, и что различные виды материальных сред обязаны своими электромагнитными свойствами наличию различных наэлектризованных частиц, разделенных эфиром и подвижных по отношению к нему.

Эта гипотеза оказалась исключительно плодотворной не только в области оптики и лучистой теплоты, но и в области чисто электрических и магнитных явлений.

Теория Лоренца является, таким образом, естественным развитием идей Максвелла и Герца. Но она сохраняет эти идеи только в их наиболее простой форме, касающейся лишь эфира; введение же понятия зерна электричества в теорию Максвелла сделало ее весьма плодотворной и повлекло за собой богатую жатву новых последствий.

Прежде всего, следует остановиться на сущности основных законов Максвелла и Герца для эфира. Затем мы рассмотрим, какие электромагнитные свойства следуют из этого для наэлектризованных центров и для материи, которая их содержит.

Свойства эфира. Эфир представляется нам непрерывной однородной средой, в любой точке которой могут накладываться два вида деформаций, характеризуемых соответственно двумя определенно направленными величинами: электрическим полем h и магнитным полем H или, иначе, соответствующими индукциями — электрической индукцией $K_0 h$ и магнитной индукцией $\mu_0 H$, где K_0 и μ_0 — две константы: диэлектрическая постоянная и магнитная проницаемость пустоты, численные значения которых зависят от выбора единиц. Каждая из этих двух деформаций эфира, электрическая и магнитная, предполагает локализацию энергии в среде с плотностью, пропорциональной квадрату соответствующего поля; в каждой точке эфира на единицу объема имеет место наложение электрической энергии $\frac{K_0 h^2}{8\pi}$ и магнитной энергии $\frac{\mu_0 H^2}{8\pi}$.

Оба поля — электрическое и магнитное — могут изменяться как при переходе от одной точки к другой, так и в одной и той же точке во времени.

Исходя из этого представления, можно сказать, что материя состоит из занятых атомами участков пространства, в которых, так же как и в пустоте, могут существовать поля и соответствующие виды энергии — электрическая и магнитная; одновременно в этих участках имеются подвижные относительно эфира электрические заряды очень малого размера, т. е. отрицательные зерна или корпускулы, и положительные заряды, размеры которых еще недостаточно известны.

Магнитное поле или его индукция распределены таким образом, что их поток, выходящий из любой замкнутой поверхности, всегда и везде равен нулю: это соответствует полному отсутствию магнитных флюидов как в пустоте, так и в материи.

Магнитное поле всегда состоит из замкнутых силовых линий, которые ниоткуда не выходят и нигде не оканчиваются.

Электрическое поле или его индукция удовлетворяют одному и тому же условию нулевых потоков в пустоте для любой замкнутой поверхности, не содержащей внутри себя материи; т. е. в пустоте электрические заряды не существуют. Материя же содержит электрические заряды, когда поток электрической индукции, исходящий от замкнутой поверхности, окружающей материальное тело, имеет определенную величину, пропорциональную внутреннему заряду. Электрические силовые линии идут от положительно заряженных участков и оканчиваются на участках, заряженных отрицательно.

Законы, открытые Максвеллом и Герцем, устанавливают наличие двойной взаимозависимости между обоими полями или, точнее говоря, между их изменениями в пространстве и во времени. Основное содержание их можно выразить в следующей качественной форме: *всякое изменение во времени одного из двух полей в какой-либо точке эфира вызывает появление другого поля;* последнее распределяется по силовым линиям, окружающим то направление, по которому изменяется первое поле.

В более точной форме это выражается, прежде всего, законом, соответствующим явлениям индукции, согласно которому всякое изменение магнитного поля порождает электродвижущую силу, т. е. дает начало электрическому полю.

Представим себе какой-либо замкнутый контур в пространстве, где происходит изменение магнитного поля во времени; работа электрического поля вдоль данного контура, или электродвижущая сила, равна изменению потока магнитной индукции в единицу времени, проходящего через всю поверхность, ограниченную этим контуром.

Благодаря гениальной интуиции Максвелл пришел к выводу, что закон, в точности коррелятивный предыдущему, требует возникновения магнитного поля и управляет им в силу изменения электрического поля в пустоте. Это и есть так называемый закон *тока смещения* Максвелла; он гласит: всякое изменение во времени электрического поля вызывает появление магнитного поля, работа которого вдоль любого замкнутого контура, или магнитодвижущая сила вдоль этого контура, равна изменению в единицу времени потока электрической индукции через любую поверхность, ограниченную в пустоте этим контуром.

Эти два связанных между собой соотношения предусматривают, как показал Максвелл, что в пустоте всякое электромагнитное возмущение распространяется во всех направлениях с определенной скоростью V.

Легко понять, что подобное распространение есть прямое следствие взаимного образования обоих полей в их непосредственной близости друг от друга, в каждой точке среды.

Скорость V этого распространения связывает, в силу двух вышеуказанных законов, управляющих взаимным образованием полей, оба коэфициента K_0 и μ_0 посредством отношения:

$$V = \frac{1}{\sqrt{K_0 \mu_0}}.$$

Кроме того, это выражение равно отношению электромагнитной и электростатической единиц количества электричества, экспериментальное сравнение которых дает величину, равную скорости света *.

Из сочетания двух вышеуказанных отношений следует, что электромагнитное возмущение, свободно распространяясь вдали от всякой материи ** по определенному направлению со скоростью света, соответствует возникновению в среде, по которой оно проходит, электрического и магнитного полей, перпендикулярных друг другу и, кроме того, перпендикулярных направлению распространения, иначе говоря, — поперечных по отношению к последнему.

Кроме того, интенсивность этих полей такова, что оба они в одной и той же точке дают одинаковую энергию на единицу объема.

---

* Наиболее точный метод такого экспериментального сравнения есть метод абсолютного конденсатора. Он был доведен до большого совершенства А. Г. Столетовым (см. *А. Г. Столетов*, Собр. соч., т. I, ГТТИ, 1939).

Сущность его состоит в том, чтобы измерить в электромагнитных единицах силу разрядного тока конденсатора, откуда можно получить величину его емкости — также в электромагнитных единицах. С другой стороны, конденсатор устраивается так, чтобы можно было *вычислить* его емкость просто по его размерам (по формуле $C = \frac{\sigma}{4\pi\delta}$); такой конденсатор называется «абсолютным» в отличие, например, от лейденской банки, которой пользовались в своих измерениях (до Столетова) Вебер и Кольрауш. Емкость этой банки можно определить лишь косвенным образом, опять-таки путем электрических измерений, в чем Столетов правильно усматривал большой недостаток для точности результатов определения.

Сравнивая вычисленную таким образом в электростатических единицах емкость конденсатора C (эл.-стат. ед.) с той же емкостью в электромагнитных единицах C (эл.-магн. ед.) находят:

$$\frac{C\ (\text{эл.-стат. ед.})}{C\ (\text{эл.-магн. ед.})} = V^2. \text{ — \textit{Прим. ред.}}$$

** Здесь, как и в других местах этой и других работ, Ланжевен употребляет неточную терминологию, распространенную в физике во второй половине XIX и начала XX в. Материей он называет только ту ее форму, которая состоит из атомов (протонов, электронов и т. п. частиц). Нередко он ее именует также веществом. Этой форме материи Ланжевен противополагает другую, которую он называет эфиром (часто он именует ее также «пустотой»). Для Ланжевена явления, протекающие в эфире, так же материальны в философском смысле, как и явления, протекающие в мире атомов, электронов и прочих частиц. В современной физике первая из вышеуказанных форм материи называется веществом. Тесно связанная с ней другая форма, изучаемая в физике, именуется полем. — *Прим. ред.*

Эта поперечность электромагнитных волн непосредственно объясняет поперечность световых волн, открытие чего навсегда останется наиболее великолепной и славной заслугой Френеля.

Последующее развитие теории Максвелла дало возможность перевести на электромагнитный язык всю теорию Френеля, дополнить ее и устранить все неясности.

Однако теория Максвелла в своей первоначальной форме, помимо уже указанного недостатка (она не объясняет ни дисперсии, ни законов распространения света в движущихся телах), ограничивается, как и теория Френеля, изучением распространения волн, оставляя в тени вопрос о том, каким образом они испускаются и поглощаются. Эта теория принимает просто тот факт, что для испускания и поглощения, а также для создания или уничтожения волн, передаваемых эфиром, необходимо вещество. Короче говоря, теория Максвелла не объясняет нам той связи, которая соединяет материю с эфиром, и это — ее фундаментальная особенность. Она начинается со статических явлений: мы видим поле, созданное наэлектризованным телом в эфире, и силовые линии, выходящие из этого тела или входящие в него, в зависимости от знака его заряда, — но теория ничего не говорит о точках прикрепления, о концах, посредством которых эти силовые линии связываются с материей.

То же можно сказать и относительно электрического тока: мы видим, как силовые линии магнитного поля окружают проводник, по которому проходит ток; видим, согласно Пойнтингу, как поток энергии течет в пустоте или в изолирующей среде около проводника параллельно току и как часть этого потока теряется в самом проводнике, превращаясь в тепло Джоуля *, — но нам не раскрывается сущность таинственных явлений, происходящих в проводнике. Что же касается волн Герца, или световых волн, то при их рассмотрении мы также останемся в неведении, почему они распространяются в материальной среде иначе, чем в пустоте, и почему материя их рассеивает. Главное же, мы совершенно не знаем, почему материя необходима для возникновения и исчезновения этих волн и что происходит при их возникновении и исчезновении.

Лоренц и Лармор пытались ввести недостающую связь между материей и эфиром при помощи электрона или атома электричества.

В особенности Лоренц развил те следствия, которые вытекают из представления о наличии во всяком веществе этих зерен электричества, покоящихся или движущихся относительно неподвижного эфира.

* Представление о движении энергии впервые ввел русский физик Н. А. Умов. Несколько лет спустя Пойнтинг распространил эти представления на случай электромагнитного поля. — *Прим. ред.*

В результате применения к эфиру, в который погружены эти зерна, ранее открытых законов Максвелла был получен прекрасный синтез большого числа электромагнитных и оптических явлений.

Сравнение с опытными фактами показывает, что зерна, придуманные Лоренцем, тождественны с зернами, которые были обнаружены и индивидуально измерены чисто экспериментальным путем, упомянутым выше.

Статические явления. Изучение испускания материей электрических зарядов показало, что из материи можно извлечь отрицательно заряженные электроны, которые гораздо меньше атомов. Вполне вероятно, что атомные или молекулярные структуры могут быть наэлектризованы лишь посредством обмена отрицательными электронами, причем они электризуются положительно, когда теряют несколько электронов, и отрицательно — когда приобретают избыток их. Этот избыток или недостаток обычно бывает очень малым, по количеству равным валентности образованного таким образом положительного или отрицательного иона.

Следовательно, мы вынуждены допустить, что атомы при нормальном, т. е. электрически нейтральном, состоянии содержат строго определенное число катодных корпускул.

Изучение явлений поглощения жестких рентгеновских лучей дает основание полагать, что это число пропорционально, а может быть даже и равно соответствующей атомной массе, если за единицу принимается масса атома водорода *.

Кусок вещества электризуется положительно, когда он испускает несколько электронов из числа содержащихся в нем при нормальном его состоянии, и отрицательно — когда получает несколько дополнительных электронов.

В настоящее время мы пока не знаем, какова структура внутренних положительных зарядов атома; нам известно только, что положительный заряд атома эквивалентен всему заряду отрицательных электронов, которые атом содержит в своем нормальном состоянии, т. е. составляет целое число, кратное элементарному атомному заряду. Иначе говоря, электрические силовые линии, находящиеся в эфире, оканчиваются на отрицательных электронах, которые могут быть свободны или связаны

* В настоящее время известно, что это число Z приблизительно равно порядковому номеру элемента в менделеевской таблице (заряду атомного ядра):

$$Z \cong \frac{A}{2},$$

где A — масса атома в водородных единицах (атомный вес). Это соотношение становится все менее точным для тяжелых атомов с большим порядковым номером. — *Прим. ред.*

в атомном здании; эти силовые линии другими концами выходят из положительных, еще малоизвестных областей, находящихся внутри атомов.

Поскольку все атомы в электрическом отношении нейтральны и каждый из них содержит свое нормальное число электронов, то каждая силовая линия остается ограниченной атомом, т. е. оба ее конца находятся внутри атома.

Когда электрон покидает свое атомное здание, он увлекает за собой в окружающее пространство и силовые линии, концы которых находятся на нем; эти линии выходят из положительно заряженного атома и заканчиваются на некотором расстоянии на одном или нескольких отрицательных электронах, потерянных атомом, независимо от того, входят ли эти электроны в состав другого атомного здания, где они в избытке, и которое оказывается вследствие этого заряженным отрицательно. Таким образом, каждая заряженная частица — электрон или ион — окружена «шевелюрой» электрических силовых линий, закрепленных на ней одним концом и устремленных в окружающую среду — другим; посредством этих линий частица испытывает и оказывает электрические действия на расстоянии.

Другой конец каждой из этих силовых линий находится в какой-то более или менее отдаленной материальной области, имеющей знак заряда, противоположный знаку заряда частицы.

Поток электрической индукции, исходящий от замкнутой поверхности, окружающей частицу, или поток, соответствующий пучку ее силовых линий, устремленных в окружающую среду, имеет вполне определенную величину.

Если частицей является электрон, то поток отрицателен и величина его соответствует элементарному атомному заряду. Если же частицей является ион, атом или сложная молекулярная структура, то этот поток положителен или отрицателен и соответствует целому кратному элементарного атомного заряда.

Пучок силовых линий наэлектризованной частицы, изолированной и находящейся в покое, расположен радиально. Эта частица создает вокруг себя электрическое поле, определенное законом Кулона, изменяющееся обратно пропорционально квадрату расстояния, но не возбуждает никакого магнитного поля. Если данная частица находится во внешнем электрическом поле h, то наложение пучка силовых линий на это поле дает силу, равную произведению ее заряда e на напряжение внешнего поля и направленную, как и само поле, в ту или иную сторону в зависимости от знака заряда. Это и есть электрическая сила he.

Любая часть материи подвергается действию внешнего электрического поля h как в том случае, когда она помещена в непосредственной близости от наэлектризованных тел, создающих вокруг себя электростатическое поле, так и в том случае, когда

через нее проходит какое-нибудь излучение или свободно распространяющееся возмущение, причем в последнем случае электрическое поле h возникает — благодаря индукции — в результате изменений магнитного поля во время распространения.

В обоих случаях электрические силы, порожденные полем внешнего происхождения, стремятся сообщить положительным и отрицательным частицам, находящимся в куске вещества, движение противоположного направления.

Аналогичные эффекты могут возникать не только под влиянием электрического поля, но и в результате других воздействий. Как мы ниже увидим, движение материи в магнитном поле создает в наэлектризованных частицах, которые она содержит и переносит с собой, электромагнитные силы; последние в свою очередь вызывают возникновение электродвижущих сил, индуцированных движением вещества в магнитном поле.

Если магнитное поле переменное, то эти силы налагаются на силы электрического поля, порожденного изменением магнитного поля. Таким образом, становится ясно, что явления индукции имеют двойное происхождение: они могут возникать как вследствие изменения магнитного поля, так и в результате движения вещества в постоянном поле.

Наэлектризованные центры — электроны или ионы — подвергаются влиянию также соседних атомов, т. е. сил сцепления или сил другого происхождения. Если вещество, находящееся в определенной области, однородно, то влияние атомов не вызывает общего движения наэлектризованных центров, находящихся в рассматриваемой области.

Если же структура вещества неоднородна, например вблизи поверхности раздела двух различных сред, то в результате, независимо от какого бы то ни было внешнего электрического поля, будут возникать электродвижущие силы, обусловленные разнородностью.

Наконец, в проводниках, где имеются наэлектризованные центры, способные свободно перемещаться через вещество, появляется в результате теплового движения особый тип электродвижущих сил, обусловленных неоднородностью, которые играют существенную роль в теории гидроэлектрических или термоэлектрических элементов.

Из основных положений кинетической теории следует, что свободные центры действуют при данной температуре среды со средней кинетической энергией, равной энергии газовой молекулы при той же температуре; если центры определенного вида расположены в среде неравномерно, то тепловое движение стремится установить равномерность распределения, т. е. стремится произвести общее передвижение рассматриваемых частиц из района их большей уплотненности в район их меньшей уплотненности.

Разница в степени концентрации свободных наэлектризованных частиц вызывает, таким образом, стремление к диффузии, а следовательно, и возникновение электродвижущей силы, так как, диффундируя, рассматриваемые частицы уносят свои заряды.

Изложенное лежит в основе теории гальванических элементов Нернста.

Все вышеперечисленные разнообразные явления могут налагаться друг на друга в одной и той же части вещества, взаимно или уравновешиваясь или неуравновешиваясь. Их эффект изменяется в зависимости от того, действуют ли они на частицы, каждая из которых связана с положением равновесия, или на частицы, свободно движущиеся в материи между молекулами или через них, если речь идет об электронах.

Изолирующие вещества, или диэлектрики, содержат, повидимому, исключительно взаимосвязанные частицы: электроны, связанные с атомами, которые их содержат, или ионы, связанные с молекулой. Связанная частица может колебаться только вокруг положения равновесия, которое, разумеется, меняется в зависимости от внешних сил, действующих на частицу. Наличие электрического поля, например, вызывает перемещение средних положений положительных частиц в одном направлении, а средних положений отрицательных частиц — в противоположном.

Таким образом, в результате влияния электрического поля или какого-либо другого действия, стремящегося произвести одновременное смещение наэлектризованных центров, возникает поляризация диэлектрика.

Эта поляризация достаточно полно объясняет электростатические свойства изолирующих веществ и изменение диэлектрической постоянной Фарадея при переходе от одной среды к другой.

Проводимость обязана наличию свободных наэлектризованных центров: электронов в металлических проводниках и ионов в электролитах или газах.

Изучение испускания катодных лучей металлами, подвергающимися различным влияниям, показывает, что все металлические проводники содержат одинаковые отрицательные электроны или катодные корпускулы, свободно передвигающиеся от одного атома к другому, независимо от тех электронов, которые могут оставаться связанными с атомными зданиями.

Обмен свободных электронов между двумя металлическими проводниками, находящимися в соприкосновении, не сопровождается никакими видоизменениями последних, в частности — никаким химическим изменением, так как эти электроны одинаковы во всех металлах, т. е. не обладают химической индивидуальностью.

В электролитах же, которыми обычно бывают жидкости, имеются свободные ионы—движущиеся наэлектризованные атомы

или молекулы. Их перемещение в среде соответствует движению электричества, которое сопровождается переносом вещества, обладающего химической индивидуальностью; результатом этого перемещения и является процесс электролиза.

В металлическом или электролитическом проводнике не может быть электрического равновесия (без взаимной компенсации в каждой точке проводника) между различными действиями, стремящимися произвести одновременное движение наэлектризованных центров; это относится ко всем видам свободных центров. Если равновесие осуществлено, то частицы обладают лишь беспорядочным тепловым движением, без какого-либо общего согласованного движения. В однородном проводнике, находящемся в состоянии покоя, условие равновесия сводится к тому, что электрическое поле должно отсутствовать в любой внутренней точке. При этих условиях только одна поверхность может нести заряды, т. е. избыток или недостаток электронов или ионов одного знака по сравнению с электронами или ионами другого знака.

Впрочем, легко понять, почему поле, находящееся на поверхностном слое, не может вывести из проводника избыточные наэлектризованные центры.

Переходу свободных центров из проводника в пустоту или в изолирующее вещество препятствуют другие действия: междуатомное сцепление или притяжение электрона к соседним атомам.

Однако если тепловое возбуждение, при условии высокой температуры, или внешнее вмешательство излучения увеличивают кинетическую энергию электрона или иона настолько, чтобы он мог преодолеть поверхностное притяжение, то проводник начинает испускать во все стороны наэлектризованные центры, разряжаясь или же заряжаясь при этом противоположно знаку тех центров, которые он испускает наиболее обильно. Данная схема соответствует явлениям Эдисона и Герца, т. е. испусканиям зарядов нагретыми или освещенными проводниками *.

Именно эти явления, позволяющие извлекать свободные электроны или ионы из проводников и изучать их индивидуально, явились блестящим подтверждением указанных концепций.

Если между различными действиями, стремящимися переместить каждый вид свободных наэлектризованных центров, не существует равновесия, то возникает общее упорядоченное движение этих центров; появляется ток проводимости.

Когда распределение движущих сил в проводнике таково, что эти силы проистекают от наличия разности потенциалов и, следо-

* «Явление Герца» — это фотоэлектрический эффект, классическое исследование законов которого было дано в работах русского физика А. Г. Столетова (см. *А. Г. Столетов*, Собр. соч., т. I, ГТТИ, 1939). — *Прим. ред.*

вательно, могут быть уравновешены электростатическим полем, то ток проводимости производит накопление зарядов и затем прекращается, если в результате этого накопления возникает электростатическое поле, уравновешивающее движущие силы в каждой точке.

Движущие силы не зависят от потенциала; и если они изменяются во времени, то ток продолжается, постоянный или переменный, в зависимости от обстоятельств. В результате появляются новые свойства, к рассмотрению которых мы и переходим.

Наэлектризованный центр в движении. До тех пор, пока наэлектризованный центр остается неподвижным по отношению к эфиру, окружающее его поле будет неизменным в любой точке среды, и, следовательно, никакого магнитного поля не возникает.

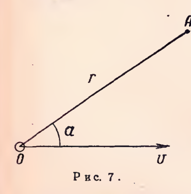

Рис. 7.

Если же наэлектризованный центр O заряда находится в движении (предположим сначала, что это движение прямолинейное и равномерное), то электрическое поле, которое он создает в определенной точке среды (например в точке A), изменяется во времени: сначала, при приближении наэлектризованного центра, увеличивается, далее переходит через максимум — при движении этого центра через основание перпендикуляра, опущенного из точки A на траекторию, затем, при удалении центра, снова уменьшается. Одновременно с этим изменяется и направление поля; оно определяется в каждый данный момент прямой, соединяющей точку A с данным положением центра O.

Как мы ниже покажем, пучок электрических силовых линий около центра распределяется радиально и равномерно по всем направлениям — как при равномерном движении, так и в состоянии покоя — до тех пор, пока скорость центра остается достаточно малой по сравнению со скоростью света, т. е. не превышает нескольких тысяч километров в секунду. Равномерно движущийся центр уносит с собой этот радиальный пучок силовых линий.

Изменение электрического поля во времени, происходящее в результате этого движения в любой определенной точке эфира, например в точке A, вызывает, как это уже было указано, возникновение магнитного поля, согласно закону Максвелла о токе смещения. Таким образом, движущийся наэлектризованный центр создает вокруг себя магнитное поле, которое располагается

по круговым силовым линиям, охватывающим направление движения.

Чтобы вывести закон распределения этого поля, достаточно применить максвелловский закон тока смещения к контуру, образованному одной из этих силовых линий, в каждой точке которой магнитное поле по законам симметрии имеет одну и ту же величину H.

В результате получается следующее.

Магнитное поле в точке A перпендикулярно плоскости, проходящей через эту точку, через данное положение O наэлектризованной частицы и через направление ее скорости.

Величина поля:

$$H = \frac{ev \sin \alpha}{r^2}. \qquad (2)$$

Возникшее таким путем магнитное поле определяется положением частицы в каждый данный момент; из этого вытекает, что его распределение, т. е. совокупность круговых магнитных силовых линий, так же как и совокупность электрических радиальных силовых линий, следует за частицей при ее движении. Вся эта система электрических и магнитных силовых линий образует так называемый электромагнитный след частицы, след, связанный с центром и неизменный по отношению к нему до тех пор, пока скорость частицы остается постоянной.

Наличие магнитного поля, сопровождающего наэлектризованную частицу в ее равномерном движении, объясняет, каким образом может измениться распределение электрического поля при наличии достаточной скорости, близкой к скорости света. Действительно, магнитное поле, созданное в определенной точке A эфира движущейся частицей, изменяется во времени по мере приближения, прохождения мимо и удаления частицы, увлекающей за собой свой комплекс силовых линий. Это изменение магнитного поля влечет, как мы уже видели, возникновение индуцированного электрического поля, которое налагается на электрическое поле, устанавливаемое законом Кулона, меняя распределение первичного поля. В результате более подробного анализа найдено, что электрические силовые линии остаются радиальными на определенном расстоянии от наэлектризованных центров, но что пучок их разряжается в направлении скорости и в обратном направлении, в то время как уплотняется в перпендикулярных направлениях. Это изменение является незначительным, если скорость наэлектризованной частицы далека от скорости света.

Электрические силовые линии, связанные с центром, стремятся, следовательно, разместиться перпендикулярно направлению

движеиия, чтобы сосредоточиться там полиостью, когда скорость иаэлектризоваииой частицы достигнет скорости света.

Полученное, таким образом, предельное распределеиие поля соответствует, одиако, бесконечной энергии, и чтобы сообщить наэлектризоваииой частице постоянную скорость, равиую скорости света, необходима, следовательно, затрата бескоиечной работы.

Все это является прямым следствием примеиеиия основных законов Максвелла к эфирной среде, окружающей иаэлектризованный центр; кроме того, здесь подтверждается, что катодиые корпускулы, испускаемые радиоактивными телами в виде β-лучей, обладают скоростями, способными возрасти до скорости света, как до иаивысшего предела, еще никогда не достигиутого ими, ио к которому они значительио приближаются.

Ток конвекции. Из основиого закона тока смещения следует, что движущееся наэлектризованное тело создает вокруг себя магнитиое поле, которое определено простым законом, выраженным формулой (2), ио при условии, если скорость его движения не слишком велика.

Это предположеиие нашло свое полное количественное эксперимеитальное подтверждение в исследоваииях так изываемых токов конвекции, являющихся неизбежным следствием максвелловского закона тока смещения.

Ток смещения, т. е. возиикновение магнитного поля в результате измеиения электрического поля, представляет собой простое и основное явление; правда, оно было открыто очеиь сложным путем, благодаря геииальной интуиции Максвелла, и затем экспериментально подтверждено Герцем. Опыты над током конвекции являются по существу проверкой точности закона тока смещеиия, но проведенной несколько иным способом, чем известиые опыты Герца иад волнами.

Ток проводимости. Перейдем теперь от тока коивекции к току проводимости, который представляет собой наиболее сложный случай возникновения магиитного поля. Несмотря иа то, что исторически он был открыт первым и, следовательио, для нас является отдаленным, однако теперь он представляется иам как самое прямое следствие простого, но очень важиого закоиа тока смещения.

Рассмотрим элемент тока проводимости, образоваиного отрезком dl металлического провода или трубкой малого сечения S, наполненной электролитом.

Наличие тока проводимости в направлеиии отрезка dl выражается в циркуляции комплекса наэлектризованных частиц: положительиых — в одном направлении и отрицательных — в другом, противоположном. Каждая из этих движущихся частиц представляет собой ток коивекции в иаправлении движения.

Чтобы в какой-либо точке A создать магнитное поле посредством элемента тока dl, нужно сложить в этой точке все магнитные поля, созданные всеми движущимися частицами, находящимися в отрезке dl; если движения этих частиц беспорядочны, то результат сложения будет равен нулю: только согласованные движения, токи проводимости, создают на расстоянии полное магнитное поле, отличное от нуля.

Если предположить, что точка A находится на расстоянии r от элемента тока, причем r является довольно большой величиной по сравнению с dl и составляет угол α с направлением тока, т. е. упорядоченного движения центров, то легко будет вычислить для всего поля величину

$$\frac{I\,dl\sin\alpha}{r^2},$$

где I — сила тока, т. е. количество электричества, проходящее в единицу времени через сечение проводника в результате упорядоченного движения частиц внутри проводника. Таким образом, мы приходим к известному элементарному закону, посредством которого Лаплас объяснил открытие опытным путем свойства токов проводимости. Природа наэлектризованных частиц, ионов или электронов, одинакова, и поэтому вполне понятно, что закон Лапласа во всех случаях равно применим как к металлическим, так и к электролитическим проводникам, следовательно, этот закон связан с основным законом тока смещения.

Наконец, несколько ниже мы покажем, почему созданное магнитами магнитное поле является следствием наличия в атомах или молекулах намагниченной среды наэлектризованных частиц, электронов, которые движутся по замкнутым орбитам. Таким образом, мы получаем непосредственное и простое представление о внутримолекулярных токах Ампера.

Электромагнитная сила. В результате свойства движущейся наэлектризованной частицы создавать магнитное поле, т. е. оказывать действия на магниты или на другие токи, находящиеся рядом, происходит реакция магнита или соседнего тока на частицы. Как уже было показано, движущаяся наэлектризованная частица эквивалентна по производимым ею магнитным действиям элементу тока проводимости, т. е. Idl равно ev. Если допустить, что эта эквивалентность существует также и для действий, вызванных внешним магнитным полем, то из этого следует, что наэлектризованная частица заряда e, движущаяся со скоростью v в магнитном поле индукции B в направлении, составляющем угол β с направлением B, подчиняется действию силы f, перпендикулярной плоскости v и B, согласно правилу трех пальцев левой руки: если большой палец направлен парал-

лельно B, а указательный — по направлению скорости v, то сила действует в направлении положения среднего пальца, если частица имеет положительный заряд, и в обратном направлении, если заряд e отрицательный.

Величина этой силы будет:

$$f = Bev \sin \beta. \qquad (3)$$

Если назвать электрокинетическим полем силу, действующую на движущуюся единицу заряда при отсутствии электрического поля, то можно сказать, что движение электрического заряда со скоростью v в магнитном поле индукции B создает электрокинетическое поле $Bv \sin \beta$, направленное согласно правилу трех пальцев.

Если одновременно имеется и электрическое поле h, то общее действие на движущуюся единицу заряда будет выражаться равнодействующей силой, или геометрической суммой электрического поля h и электрокинетического поля $Bv \sin \beta$. Кроме того, электродвижущие силы, возникающие вследствие неоднородности, могут присоединиться к двум вышеуказанным полям и действовать на свободные наэлектризованные частицы в проводниках. Наконец, связанные частицы, находящиеся как в диэлектриках, так и в проводниках, испытывают индивидуальные действия, которые и удерживают каждую частицу вблизи определенного положения.

Таким образом, на основе этих результатов мы уже теперь можем делать многочисленные выводы.

Сила действия магнитного поля на элемент тока Idl представляет собой равнодействующую электромагнитных воздействий поля на внутренние частицы проводника, упорядоченное движение которых соответствует прохождению тока. Эти силы передаются массе проводника посредством непрерывных толчков наэлектризованных частиц о молекулы.

При отсутствии тока существует лишь беспорядочное тепловое движение, при котором электромагнитные силы, испытываемые частицами, взаимно уничтожаются во всем проводнике. Возникающее при прохождении тока правильное движение, которое налагается на тепловое беспорядочное движение, выражается, наоборот, равнодействующей силой, перпендикулярной направлениям магнитной индукции и тока.

Кроме этого, установлено, что при прохождении тока по проводнику индивидуальные электромагнитные силы стремятся в среднем переместить наэлектризованные частицы по отношению к проводнику перпендикулярно направлению тока и магнитного поля.

В результате происходит искривление линии тока в указанном направлении, т. е. возникает явление Холла.

Явления индукции. Основной закон, выраженный формулой (3), дает основание предполагать, что при перемещении проводника в постоянном магнитном поле возникают явления индукции.

Рассмотрим самый простой случай. Предположим, что стержень l движется со скоростью v нормально к своей длине в магнитном поле, имеющем индукцию B и перпендикулярном к плоскости, образуемой $l - v$.

Наэлектризованные частицы, находящиеся в стержне в свободном состоянии и обеспечивающие ему проводимость, увлекаются им со скоростью v. Движение вызывает в каждой частице возникновение силы, соответствующей кинетическому полю Bv и направленной по длине стержня. Эти силы стремятся возбудить в стержне ток с электродвижущей силой Bvl, равной работе электрокинетического поля при передвижении единицы заряда с одного конца стержня на другой. Таким образом, становится понятным, почему движение тела в магнитном поле вызывает действие, стремящееся передвинуть отрицательные частицы данного вещества в одном направлении, а положительные — в другом, противоположном. Эти силы перпендикулярны направлению магнитного поля и направлению движения. Они поляризуют среду, если речь идет о диэлектрике, и могут возбудить ток, если речь идет о проводнике.

Полученная таким образом электродвижущая сила Bvl точно равняется потоку индукции Φ, пересекающемуся стержнем в единицу времени. В этом частном случае вновь выступает общий закон индукции в виде $\frac{d\Phi}{dt}$. Применение правила трех пальцев показывает, что направление этой электродвижущей силы соответствует закону Ленца *.

Если оба конца стержня изолированы и ток не замкнут, то электрокинетическое действие индукции производит лишь незначительное перемещение свободных частиц: положительные частицы накапливаются на одном конце стержня, а отрицательные — на другом до тех пор, пока в каждой точке стержня не образуется электростатическое поле Bv, уравновешивающее электрокинетическое поле. В результате между концами стержня возникает разность потенциалов, равная электродвижущей силе, как это бывает в случае элемента при незамкнутой внешней цепи.

---

* Установленный русским физиком Э. Х. Ленцем закон гласит: Индукционные токи, возникающие в проводнике при движении его в постоянном магнитном поле, направлены так, что испытываемые этими токами пондеромоторные силы магнитного поля противодействуют движению проводника. Нетрудно понять, что закон Э. Х. Ленца представляет собой выражение закона сохранения энергии для случая электромагнитных явлений. Работы Э. Х. Ленца являются одним из важнейших этапов на пути обоснования закона сохранения и превращения энергии. — *Прим. ред.*

Если ток, проходящий по стержню, замкнут и не содержит противодействующей электродвижущей силы, превосходящей индуцированную электродвижущую силу, то возникает ток, движущийся в направлении этой силы; частицы приходят в упорядоченное движение под влиянием индуцированного электрокинетического поля, и стержень передает электроэнергию в остальную часть замкнутой цепи. Одновременно с этим, вследствие увеличения интенсивности толчков, возникающих при наложении упорядоченного движения на первоначальное тепловое, внутри цепи развивается теплота Джоуля.

Совершенно очевидно, что эта двойная затрата энергии происходит за счет сил, поддерживающих стержень в движении: ток движется соответственно правилу трех пальцев таким образом, что магнитное поле вызывает появление силы, перпендикулярной стержню и направленной противоположно его движению. Эта сила препятствует силам, стремящимся поддержать стержень в движении; работа, затраченная для ее преодоления, как раз и представляет собой электрическую энергию тока. Стержень является, таким образом, генератором постоянного тока, преобразующим механическую работу в электрическую энергию.

Если в цепи имеется противодействующая электродвижущая сила, превосходящая Bvl, то ток идет в направлении, противоположном наведенной электродвижущей силе, которая, вместо того чтобы давать электроэнергию, наоборот, сама расходует часть энергии, заимствованной у источника противодействующих электродвижущих сил. Эта энергия вновь появляется в виде механической работы, так как при изменении направления движения тока сила, испытываемая стержнем со стороны магнитного поля, действует в том же направлении движения и производит работу вместо того, чтобы ее поглощать. Стержень функционирует, таким образом, подобно электрическому двигателю, превращающему электрическую энергию в механическую работу. Наведенная электродвижущая сила, возникающая в результате воздействий электромагнитных сил на частицы движущегося стержня, является промежуточным механизмом, посредством которого производится указанное преобразование. Этот механизм объясняет, что́ происходит в обмотке работающей динамомашины, т. е. в стержнях, движущихся в постоянном магнитном поле, которое стремится отбросить наэлектризованные частицы стержней перпендикулярно своему направлению и направлению скорости.

Таким образом, становятся понятными явления индукции, вызванные движением вещества в постоянном магнитном поле. Другие явления индукции, возникающие вследствие изменения во времени магнитного поля, объясняются наличием электрического

поля, создающегося в результате данного изменения. Эти два эффекта могут накладываться друг на друга в движущемся теле при наличии переменного магнитного поля; происходит наложение электрического поля, возникающего вследствие изменения магнитного поля, на электрокинетическое поле, которое возникает в результате движения.

Лучистое давление. Основываясь на соображениях совершенно иного порядка, легко понять также возникновение лучистого давления; последнее было предсказано Максвеллом лишь в смутной форме, так как тогда он еще не знал о хорошо известной нам теперь связи между эфиром, где распространяется волна, и материей, которая ее поглощает или отражает

Представим себе металлическую проводящую пластинку, одна из плоскостей которой воспринимает электромагнитную, например световую, радиацию. Предположим, что направление распространения нормально и волновые поверхности, следовательно, параллельны пластинке.

Как уже было сказано, в плоскости волны имеются перпендикулярные друг другу электрическое и магнитное поля. Электрическое поле возбуждает в поверхностном слое пластинки плоскостный ток, т. е. упорядоченное движение свободных наэлектризованных частиц, благодаря которым пластинка обладает свойством проводимости.

Поскольку это упорядоченное движение возникает в магнитном поле волны, то на частицы действуют электромагнитные силы, перпендикулярные направлению скорости, параллельной электрическому полю, и силы магнитного поля, перпендикулярные к плоскости волны и направленные в сторону ее распространения. Иначе говоря, излучение, встречая свободную наэлектризованную частицу, заставляет ее двигаться по направлению своего электрического поля; магнитное же поле волны действует на эту приведенную в движение частицу в направлении распространения луча. Наэлектризованная частица толкается, таким образом, излучением в направлении своего распространения. Созданные при этом в пластинке молекулярные силы передаются металлу посредством толчков, что и создает давление излучения на проводник. Итоги вычислений, произведенных на этой основе, точно совпадают с фактами *.

* Световое давление было экспериментально обнаружено и измерено в блестящих работах замечательного русского физика П. Н. Лебедева. Ему удалось при этом измерить давление света не только на металлы, но и на газы, что было значительно сложнее. По общему признанию, эти работы П. Н. Лебедева явились верхом экспериментального искусства. Они были использованы для теории кометных хвостов, созданной знаменитым русским астрофизиком Ф. А. Бредихиным. Опыты Лебедева явились одним из решающих доказательств справедливости электромагнитной теории. — *Прим. ред.*

Катодные частицы и испускание положительных лучей. Наличие электромагнитной силы можно установить совершенно точно, если перейти от явлений возникновения тока в проводниках, где ясно проявляется лишь общее действие этой силы на бесчисленное количество частиц, к рассмотрению катодных лучей или же каналовых лучей Гольдштейна, когда каждая испускаемая частица свободно движется в пустоте, не испытывая постоянного стеснения вследствие толчков о молекулы материальной среды.

Как известно, катодные лучи отклоняются в магнитном поле, и каждая отрицательно наэлектризованная частица этих лучей подвергается действию силы, перпендикулярной ее скорости и магнитному полю.

Точность формулы (3) доказана тем, что применение ее для определения отношения $\frac{e}{m}$, т. е. отношения заряда к массе частицы, дает всегда одинаковые результаты. Эта формула требует, чтобы траектория частицы, движущейся в данном магнитном поле со скоростью v, имела кривизну, пропорциональную отношению $\frac{e}{mv}$. В электрическом поле, перпендикулярном направлению лучей, траектория также искривляется, но ее кривизна в данном случае будет $\frac{e}{mv^2}$. Измерения магнитного и электрического отклонений дают возможность получить отдельно $\frac{e}{m}$ и v.

В настоящее время уже известно, каким образом эти измерения, проведенные на различных видах катодных частиц — лучах трубок Крукса, фотоэлектронах, отрицательных частицах, полученных от раскаленных добела тел, и, наконец, медленных лучах β-радиоактивных веществ, — привели к одной и той же величине отношения $\frac{e}{m}$, близкой к $1{,}77 \cdot 10^7$ в электромагнитной системе CGS. Катодная частица, как известно, несет заряд, равный заряду водородного атома при электролизе, величина которого, по закону Фарадея, составляет в той же системе единиц 9654, или 10^4, а это доказывает, что катодная частица всегда в 1800 раз менее инертна, чем водородный атом, независимо от вида вещества, из которого исходят катодные лучи, и от способа их получения.

Положительные частицы лучей Гольдштейна или положительный поток в трубках Крукса, анодные лучи или α-лучи радиоактивных тел гораздо более инертны и гораздо меньше склонны к отклонению при одинаковой скорости. Это атомы или молекулы, лишенные одной или нескольких катодных корпускул, которые в них содержатся в нормальном состоянии. При изучении явлений лучеиспускания мы, безусловно, обнаружим новые доказательства наличия катодных корпускул внутри атомов. Для

определения их свойств, заряда и массы, совершенно не обязательно насильно извлекать их из атомного здания, — вполне достаточно изучить испускаемое ими излучение. Это приводит к замечательному подтверждению наших концепций.

III. ЯВЛЕНИЕ ЛУЧЕИСПУСКАНИЯ

Волна ускорения. Основным положением теории испускания материей электромагнитных излучений является следующее: наэлектризованная частица, получив при неравномерном движении ускорение, испускает волну, которая распространяется вокруг нее во всех направлениях со скоростью света. Все это представляет собой не что иное, как следствие свойств электромагнитного эфира, которые определены вышеизложенными законами Максвелла и Герца.

Несмотря на то, что до сих пор нами были рассмотрены лишь частицы, находящиеся в состоянии покоя или равномерного движения, все же нам удалось объяснить большое количество электростатических и электромагнитных явлений. Наиболее распространенный случай — движение частицы с переменной скоростью, т. е. наличие ускорения, вводит нас в область лучеиспускания.

Мы видели, что частица, движущаяся с постоянной скоростью, уносит с собой в эфир и свой след — комплекс своих радиальных электрических и круговых магнитных силовых линий. Это представляет собой, по предположению, высказанному Фарадеем, не что иное, как распределение энергии в пространстве, окружающем частицу. При постоянной скорости распределение энергии (изменяющееся, впрочем, с изменением скорости частицы) следует за частицей при ее движении и остается локализованным вблизи нее; ни малейшая часть этой энергии не излучается в пространство.

Совершенно иначе обстоит дело при изменении скорости. Приводимое ниже сравнение дает нам лишь общее представление о том, что происходит вдоль электрических силовых линий после того, как частица, с которой они связаны, получает ускорение. Представим себе, что в середине какой-то оболочки находится шар, который поддерживается в равновесии посредством упругих проволочек, натянутых во всех направлениях между поверхностью шара и поверхностью оболочки. Пока вся система находится в покое или в равномерном движении, эти проволочки, подобные пучку силовых линий, натянуты прямолинейно. Если же шар получит толчок в определенном направлении и, следовательно, скорость его изменится, то, кроме возникновения продольных деформаций, по проволочкам, сразу же после толчка, побегут поперечные волны, причем скорость их распростране-

ния будет зависеть от свойств вещества, из которого они состоят.

Поперечные деформации будут иметь наибольшую амплитуду на проволочках, расположенных перпендикулярно направлению толчка; по мере перехода к проволочкам, расположенным параллельно этому направлению, амплитуды прогрессивно уменьшаются и на последних проволочках, параллельных направлению толчка, совершенно исчезают.

Продольные деформации не представляют интереса для сравнения: в нашу задачу не входит демонстрация механической модели, воспроизводящей во всех подробностях свойства электромагнитной среды. Многочисленные попытки, предпринятые в этой области, потерпели настолько большую неудачу, что нам кажется гораздо более целесообразным попытаться объяснить механические свойства материи посредством электромагнитных процессов, чем наоборот.

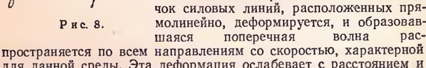

Рис. 8.

Поперечные деформации проволочек можно использовать в качестве наглядных изображений для показа изменений электрического поля, распространяющихся вдоль силовых линий со скоростью света после того, как наэлектризованная частица получает ускорение.

Действительно, когда частица получает толчок и ее скорость изменяется, то пучок силовых линий, расположенных прямолинейно, деформируется, и образовавшаяся поперечная волна распространяется по всем направлениям со скоростью, характерной для данной среды. Эта деформация ослабевает с расстоянием и изменяется в зависимости от направления: от максимума для силовых линий, перпендикулярных направлению ускорения, до нуля для силовых линий, параллельных этому направлению.

Ниже приводится выражение, принятое для случая, когда скорость частицы мала по сравнению со скоростью света.

Предположим, что в момент t наэлектризованная частица, находящаяся в точке O, получает ускорение γ. Пертурбация, которая произойдет при этом в окружающем пространстве, обнаружится в точке A, находящейся на расстоянии r от O, в направлении, образующем угол φ с направлением ускорения, с опозданием $\frac{r}{V}$, равным промежутку времени, необходимому для пробега расстояния r со скоростью распространения света в пустоте V.

Таким образом, в момент $t+\frac{r}{V}$ на радиальное электрическое поле, созданное равномерно движущейся частицей в точ-

ке A и обратно пропорциональное квадрату расстояния, налагается поперечное электрическое поле, расположенное в плоскости, проходящей через точку A, а также ускорение. Это добавочное поле перпендикулярно расстоянию OA и имеет направление, указанное на рис. 8. Оно обратно пропорционально расстоянию OA и прямо пропорционально синусу угла φ, образованного направлением OA с направлением ускорения.

Если e — заряд частицы, то это поле, измеренное в электромагнитной системе CGS, будет:

$$h = \frac{e\gamma}{r} \sin \varphi.$$

Одновременно с этим в точке A возникает магнитное поле, также перпендикулярное направлению OA и вышеуказанному электрическому полю. Иначе говоря, магнитное поле перпендикулярно плоскости рисунка и обращено вперед, если заряд e положителен. Таким образом, все три направления — электрическое поле, магнитное поле и направление распространения — расположены согласно правилу пальцев правой руки. Магнитное поле по своей величине таково, что оно содержит в единице объема такое же количество энергии, как и соответствующее электрическое поле.

Таким образом, наэлектризованный центр, имеющий ускорение, вызывает пертурбацию, которая распространяется в виде сферической волны с радиусом, возрастающим со скоростью света. Эта волна имеет центр в точке, где находилась частица в момент испускания; она соответствует в каждой точке прохождению электрического и магнитного полей, расположенных в плоскости, касательной к фронту поперечной волны, и перпендикулярных друг другу в этой плоскости. Электрическое поле направлено противоположно проекции $\gamma \sin \varphi$ ускорения на эту касательную плоскость. Из нижеследующего станет ясно, что эта противоположность направлений соответствует закону Ленца для тех явлений индукции, которые можно объяснить явлением испускания волн.

Величина электрического поля, так же как и магнитного, пропорциональна этой проекции, т. е. она уничтожается в направлении ускорения, для которого φ равно нулю, и возрастает пропорционально увеличению угла, достигая максимума по направлениям, перпендикулярным ускорению. Эти поля, находящиеся в волне и зависящие от наличия ускорения, налагаются на поля, соответствующие скорости частицы в данный момент. Последние изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния и ослабляются по мере удаления от частицы гораздо быстрее первых. Таким образом, на большом расстоянии от частицы остается лишь волна ускорения, поля которой изменяются обратно пропорционально первой степени расстояния.

Этот факт можно выразить также и в несколько иной форме. Как уже было показано, постоянная скорость частицы не вызывает никакого излучения энергии в окружающую среду: бесконечность как бы не знает о существовании постоянной скорости, так как энергия, соответствующая движению частицы с постоянной скоростью, сопровождает ее и остается с нею связанной. Волна же ускорения переносит в бесконечность энергию, вычислить которую очень легко; посредством этой энергии даже самые отдаленные точки предупреждаются об изменении скорости. Частица излучает радиацию только в том случае, если она получает ускорение.

Действительно, рассмотрим волны, испускаемые частицей, которая получила ускорение в бесконечно малый отрезок времени dt, заключенный между t и $t + dt$, и найдем, как распределяются эти излученные волны в последующий момент $t + \Theta$. Пертурбация, возникшая в момент t, находится в момент $t + \Theta$ на сфере радуса $V\Theta$ с центром в той точке, где находилась частица в момент t.

Пертурбация, испущенная в момент $t + dt$, имеет для своего распространения лишь отрезок времени $\Theta - dt$ и находится в момент Θ на сфере радиуса $V\Theta - Vdt$ с центром в точке, где находилась частица в момент $t + dt$. Поскольку скорость v частицы всегда меньше скорости света V, то обе сферы не пересекаются, так как расстояние vdt между их центрами меньше разности Vdt их радиусов. Между этими сферами имеется тонкий слой или перепонка, в которой в момент Θ находится вся пертурбация, излученная в течение отрезка времени dt.

Если скорость частицы мала по сравнению со скоростью света, то обе сферы можно рассматривать как концентрические, разделенные слоем излучения, толщина которого Vdt всюду одинакова. Если же, наоборот, частица обладает такой скоростью, что ее перемещение в течение отрезка времени dt того же порядка, что и Vdt, или, иначе говоря, если скорость частицы приближается к скорости света, то обе сферы уже не являются концентрическими, и при этом ясно обнаруживается, что толщина слоя по направлению движения частицы меньше, чем в противоположном направлении.

Каковы электрическое и магнитное поля, возникающие в излучаемой волне при скорости достаточно малой по сравнению со скоростью света, — об этом мы уже сказали. Следовательно, мы можем вычислить энергию, которую они обуславливают в каждой точке сферического слоя на единицу объема. Эта плотность энергии, пропорциональная квадрату поля, изменяется обратно пропорционально квадрату радиуса слоя по мере его распространения, так как каждое из двух полей уменьшается обратно пропорционально этому радиусу. Объем волнового слоя

при постоянной толщине увеличивается так же, как и квадрат радиуса; следовательно, содержащееся в волне полное количество энергии не зависит от этого радиуса и представляет собой энергию, испускаемую частицей в отрезок времени dt в виде излучения и передаваемую волной в бесконечность. Простое вычисление дает для этой энергии величину, выражаемую в электромагнитных единицах формулой:

$$\frac{2}{3}\frac{e^2\gamma^2}{V}dt. \tag{4}$$

Таким образом, излучение частицы в единицу времени пропорционально квадрату ее заряда и квадрату сообщенного ей ускорения.

Взаимная индукция. Рассмотрим теперь некоторые следствия предыдущих результатов, которые содержат в себе, прежде всего, объяснение явлений взаимной индукции и самоиндукции.

Поскольку мы уже установили, что происходит в динамо, или генераторе тока, то нетрудно понять явления, происходящие в трансформаторе или в катушке Румкорфа, т. е. явления индукции, вызванные в данной цепи изменениями тока, проходящего по соседней цепи.

Представим себе, что две параллельные проволочки расположены рядом. Возьмем для примера хотя бы два соседних витка в трансформаторе, из которых один принадлежит наводящему току, а другой — наведенному. Прохождение наводящего тока представляет собой движение в первой проволочке свободных наэлектризованных частиц, которые и делают проволочку проводником. Скорость движения этих частиц по проволочке пропорциональна силе тока, и поэтому всякое изменение силы тока вызывает изменение скорости, т. е. ускорение частиц. В результате в момент изменения силы наводящего тока происходит испускание из проволочки волн ускорения, которые распространяются посредством наложения друг на друга волн, испускаемых в отдельности всеми частицами. Это наложение волн ускорения возбудит, следовательно, в точке, расположенной около проволочки, электрическое поле, параллельное току и направленное в обратную сторону, если сила тока увеличивается, и в ту же сторону, если сила тока уменьшается.

Если рассматриваемая точка находится внутри соседней проволочки, принадлежащей индуцируемой цепи, то возникшее электрическое поле будет стремиться возбудить ток, т. е. будет соответствовать наличию наведенной электродвижущей силы, причем направление ее будет обратным наводящему току, если последний увеличивается, и одного с ним направления при его уменьшении.

При незамкнутой индуцируемой цепи электродвижущая сила проявляется в разности потенциалов на концах цепи вследствие

накопления зарядов, перемещенных электрическим полем волны; это накопление приводит к возникновению электростатического поля, уравновешивающего в каждой точке наведенное электрическое поле.

При замкнутой же индуцируемой цепи возникает ток по направлению электродвижущей силы; энергия, которую он представляет собой, заимствуется у индуцирующей цепи посредством реакции на него индуцируемой цепи при помощи механизма, анализ которого дан был выше.

Возникновение наведенного тока предполагает ускорение соответствующих частиц и, следовательно, испускание ими волн, которые создают в цепи индуктора наведенное электрическое поле с направлением, противоположным наводящему току. Неизбежным следствием этого является появление противодействующей электродвижущей силы, т. е. реакции индуцируемой цепи на цепь индуктора. Посредством этой реакции электрическая энергия заимствуется у индуктора и используется в индуцируемой цепи.

Самоиндукция. Явления индукции тока на самого себя объясняются таким же образом. Если ток увеличивается, то возникающие волны ускорения концентрируются как в самой цепи, так и вне ее и создают электрическое поле с направлением, противоположным току. Энергия, необходимая для увеличения магнитного поля, окружающего цепь, заимствуется посредством этого тока из источника, дающего ток. Поскольку при уменьшении тока ускорения положительных частиц направлены противоположно направлению тока, то излучаемые волны создают в проводнике электродвижущее поле, посредством которого в цепь возвращается энергия окружающего ее магнитного поля.

Подобные же факты можно наблюдать и при анализе механизма инерции, которая представляет собой глубокую аналогию с явлениями самоиндукции.

Наличие инерции в наэлектризованной частице объясняется, по крайней мере частично, возникновением магнитного поля, обусловленного ее скоростью, а также тем обстоятельством, что находящаяся в этом поле энергия, пропорциональная квадрату скорости, должна изменяться вместе с нею. Волна ускорения, неизбежно сопровождающая любое изменение скорости, является как бы посредником, через который окружающая частицу среда получает дополнительную магнитную энергию при увеличении скорости или возвращает ее обратно в избытке при уменьшении скорости. Сила инерции, т. е. сопротивление, которое оказывает частица изменению скорости, возникает вследствие действия на каждый элемент ее заряда электрического поля, находящегося в волнах ускорений, испускаемых другими элементами этого заряда. Таким образом, существующий параллелизм

превращает инерцию в настоящую самоиндукцию конвекционного тока, соответствующего движению частицы.

Интересно отметить, что возникновение таких внешне глубоко различных явлений, как взаимная индукция, самоиндукция, инерция и, как мы увидим ниже, испускание волн Герца, а также света и лучей Рентгена, можно объяснить одной и той же причиной, сформулированной законом, по которому испускание волн является результатом ускорения наэлектризованных центров.

Волны Герца. Из вышеизложенного ясно, что изменение тока в проводнике, создающее ускорение в движении наэлектризованных частиц, сопровождается, вследствие наличия этого ускорения, испусканием волн, которые распространяются в пространстве со скоростью света. Их наложение создает волны Герца, которые неизбежно возникают всякий раз, когда по цепи проходят переменные токи; существование этих волн уже дало нам возможность понять и объяснить явления взаимной индукции и самоиндукции.

Совершенно очевидно, что при одном и том же изменении тока эти волны, испускаемые в пространстве, будут наиболее интенсивными, если электрическое поле имеет одинаковое направление во всех волнах ускорения, которые налагаются друг на друга, иначе говоря, если все элементы тока и все ускорения частиц параллельны между собой.

Этим и объясняется применение прямолинейных антенн, в которых, для испускания интенсивных волн Герца, циркулируют переменные токи большой частоты.

Интенсивные волны Герца, встречая на некотором расстоянии приемную антенну, параллельную электрическому полю, которое они содержат, вызывают в этой антенне ток, служащий для обнаруживания их прохождений. Этот ток, настоящий индуцированный ток отличается от тока, созданного первичной обмоткой трансформатора в соседней вторичной обмотке, лишь несколько большим запаздыванием, соответствующим времени, необходимому волне ускорения для того, чтобы преодолеть со скоростью света расстояние, которое отделяет индуцирующую антенну от индуцируемой. Интенсивность индуцированного явления уменьшается с увеличением расстояния, т. е. в точном соответствии с законом обратного расстояния, который следует из вышеприведенных формул. Взаимные реакции обеих обмоток, рассмотрение которых весьма важно для определения работы трансформаторов, не имеют значения при передаче волн Герца, для которых вопрос о коэфициенте отдачи энергии не играет никакой роли. Помимо этих особенностей, сущность явлений остается той же самой: возбуждение приемной антенны антенной испускающей представляет собой лишь явление взаимной индукции, и роль волн ускорения в обоих случаях совершенно одинакова.

Лучи Рентгена. Открытие лучей Рентгена явилось поразительным подтверждением правильности электромагнитной теории волн ускорения, так как само получение этих лучей путем внезапной задержки катодных частиц, выбрасываемых со скоростью 20 000—100 000 *км/сек,* совершенно ясно показывает наличие изменений скорости или ускорений наэлектризованных частиц.

Вскоре после открытий, сделанных Рентгеном, Стокс и Вихерт, независимо друг от друга, предложили рассматривать эти новые лучи как результат электромагнитных пульсаций, испускаемых в эфир в момент задержки катодных корпускул. Задержка происходит на очень коротком отрезке пространства, повидимому, близком к размерам атомов, и продолжается лишь очень короткое время. Поскольку частицы движутся с очень большой скоростью, близкой к скорости света, то толщина испускаемого сферического слоя должна быть очень малой, близкой к размерам атомов. Этой исключительной тонкостью электромагнитных пульсаций, из которых состоят лучи Рентгена, и объясняются их чрезвычайная проникающая способность, а также отсутствие в обычных условиях преломления и дифракции. В соответствии с этой теорией, проникающая способность — жесткость лучей Рентгена — возрастает с увеличением скорости катодных лучей, т. е. по мере уменьшения продолжительности толчка и, следовательно, толщины испускаемых слоев.

Таким же образом γ-лучи радиоактивных тел, обладающие свойствами, подобными свойствам лучей Рентгена, но имеющие гораздо бо̀льшую проникающую способность, будут соответствовать очень тонким слоям, испускаемым в момент выталкивания или задержки катодных частиц, обладающих огромной скоростью и образующих β-лучи. Остроумное замечание Зоммерфельда дало замечательное подтверждение этому толкованию природы лучей Рентгена.

Опыты показали, что лучи Рентгена, испускаемые трубками Крукса в направлениях, соседних с направлением испускания катодных лучей, по крайней мере, в некоторой своей части, обладают гораздо большей проникающей способностью, чем те, которые испускаются в других направлениях. Мы уже отмечали, что если наэлектризованный центр, испытывающий ускорение, движется со скоростью, близкой к скорости света, то испущенный слой будет более тонким в направлении скорости, чем в других направлениях. Отсюда следует изменение проникающей способности, возрастающей с уменьшением продолжительности прохождения слоя, т. е. с уменьшением времени, которым располагает слой для смещения встречаемых им в веществе электронов и для передачи последним энергии, которую он несет.

В данном случае речь идет о той части лучей Рентгена, которая, как показал Баркла, поляризована, т. е. содержит электри-

ческое поле с определеным направлением, зависящим от направления падающих катодных лучей, в соответствии с вышеизложенной теорией, требующей, чтобы электрическое поле, созданное в волне, было связано с направлением ускорения.

Таким образом, лучи Рентгена и γ-лучи имеют ту же природу, что и лучи Герца. В обоих случаях речь идет о волнах ускорения, и разница состоит лишь в скорости движения наэлектризованных частиц — источников излучения.

Что касается волн Герца, то ускорение изменяется в зависимости от периодов, обусловленных электрическими колебаниями цепей; длина соответствующих волн колеблется от нескольких километров до нескольких миллиметров.

Что же касается лучей Рентгена и особенно γ-лучей, то ускорение возникает и исчезает в течение отрезка времени, равного примерно времени, которое необходимо свету для прохождения через атом. Длина волн, содержащихся в спектре этих лучей, приближается к атомным размерам, т. е., как показывают опыты с дифракцией, значительно меньше миллионной доли миллиметра и находится, повидимому, между 10^{-8} и 10^{-9} *см*.

Свет. Между двумя вышеуказанными крайностями располагаются волны ускорения, представляющие собой лучистую теплоту, видимый и ультрафиолетовый свет с длинами волн от 10^{-1} до 10^{-4} *мм*.

Испускание света является, по нашим понятиям, результатом движения находящихся в веществе наэлектризованных частиц, вызванного или хаотичным тепловым движением — и тогда мы имеем сплошной спектр раскаленных добела тел, или упорядоченными периодическими колебаниями внутри атома — в этом случае получается прерывный спектр полос и линий, находящихся в тесной связи с химической природой источника.

Возьмем для примера самый простой случай. Предположим, что наэлектризованная частица движется равномерно по круговой орбите вокруг центра притяжения. Это равномерное вращение предполагает возникновение в каждый момент обращенного к центру ускорения переменного направления, но постоянной величины. В результате происходит непрерывное испускание правильных волн, период которых равен времени обращения. Рассмотрим, как изменяется характер этого излучения в зависимости от направления, по которому оно происходит.

Предположим, прежде всего, что наблюдатель находится в плоскости орбиты на большом сравнительно с радиусом расстоянии. Электрическое поле волны, согласно вышесказанному, постоянно расположено в плоскости орбиты, поскольку эта плоскость содержит направление визирования и направление ускорения. Сохраняя определенное направление, перпендикулярное первому из указанных направлений, электрическое поле перио-

дически меняется пропорционально проекции ускорения на плоскость фронта волны. Это постоянство направления электрического поля означает, что электромагнитное излучение, наблюдаемое в плоскости орбиты, *поляризовано прямолинейно в плоскости, перпендикулярной к плоскости орбиты.*

Перейдем теперь к направлению, перпендикулярному орбите вдоль прямой, проходящей через ее центр. Проекция ускорения на плоскость фронта волны, параллельной орбите, получается без сокращения размеров и вращается со скоростью одного оборота в период. Таким образом, в этом направлении получается излучение, поляризованное по кругу.

В наклонных направлениях получается эллиптически поляризованный свет. Аналогичным образом можно проследить, что частица, находящаяся в периодическом колебательном движении вдоль прямой, будет испускать во всех направлениях излучение, поляризованное прямолинейно в плоскости, проходящей через направление рассматриваемого луча и перпендикулярной к плоскости, проходящей через луч и через прямолинейную траекторию.

Таким образом, свет, испускаемый материей, представляет для нас как бы отдаленное эхо постоянных изменений скорости, которым подвергаются электрические зерна внутри материи; такие изменения происходят или вследствие беспрерывных толчков, возникающих от тепловых движений, или вследствие искривления траекторий зерен, необходимого для того, чтобы зерна оставались внутри атомов, с которыми они связаны.

Это излучение свидетельствует о наличии электрических центров; изучение свойств этих центров и их изменений вследствие различных влияний, дает возможность, не извлекая центры из материи, которая их содержит, получить о них ценные сведения, определить их заряд и их массу, которые, как мы увидим, будут точно соответствовать результатам исследований прямыми методами. Со всем этим мы встретимся, когда будем изучать, каким образом наличие наэлектризованных центров объясняет не только испускание, но и поглощение излучения и законы его распространения через различные виды материальных сред.

Явление Зеемана. Известно, что интенсивное магнитное поле, действуя на источник света, изменяет излучение атомов источника и производит разложение линий его спектра испускания на большее или меньшее число близких линий. Характер разложения бывает зачастую очень сложным, но в наиболее простом случае первоначальная линия заменяется триплетом, если рассматривается в направлении, перпендикулярном направлению силовых линий магнитного поля, и дуплетом — для луча в направлении силовых линий магнитного поля. В последнем случае обе составляющие дуплета, заменяющего первоначальную ли-

нию, одинаково смещены в обе стороны от последней и поляризованы по кругу: более преломляемая — в направлении движения тока, образующего магнитное поле, и менее преломляемая — в противоположном направлении. Составляющие триплета, наблюдаемые в перпендикулярном направлении, наоборот, поляризованы прямолинейно. Центральная составляющая, совпадающая с первоначальной линией, поляризована в плоскости, перпендикулярной к направлению магнитного поля; две другие составляющие, имеющие такую же длину волны, как и составляющие дуплета, поляризованы в плоскости, которая проходит через магнитное поле.

Расстояние между составляющими пропорционально интенсивности магнитного поля.

Все эти особенности Лоренц предвидел (количественно и качественно) как следствие действия магнитного поля на внутриатомное движение электронов. Как мы уже установили, магнитное поле действует на движущийся электрон с силой, перпендикулярной полю и скорости, пропорциональной интенсивности поля и в направлении, зависящем от знака заряда электрона. Эта сила изменяет движение электрона, а следовательно, и испускаемое им излучение.

Рассмотрим лишь простой случай электрона, обращающегося по круговой орбите около центра притяжения. Лоренц изучил случай, когда сила, удерживающая электрон вблизи центра притяжения, пропорциональна расстоянию. Известно, что в этом случае при отсутствии внешних сил, как, например, магнитного поля, круговое движение имеет период, независимый от начальных условий и, следовательно, от радиуса орбиты. Если образовать магнитное поле, перпендикулярное к плоскости орбиты, то возникающая при этом радиальная сила увеличивает или уменьшает притяжение к центру, в зависимости от направления обращения и знака движущегося заряда. В результате получится увеличение или уменьшение числа оборотов в секунду, т. е. частоты испускаемого излучения.

Рассмотрим теперь только те атомы источника света, для которых плоскость орбиты, описываемой электроном, перпендикулярна направлению магнитного поля. Вследствие беспорядочного распределения атомов циркуляция будет происходить для одной половины рассматриваемых атомов в одном направлении и для другой — в противоположном направлении. Если заряд электронов отрицательный, то, как нетрудно видеть, вследствие действия магнитного поля частота увеличивается для атомов, движущихся в направлении тока, создающего поле, и уменьшается для остальных. Излучение, испущенное по направлению магнитного поля, будет соответствовать, таким образом, двум спектральным линиям, поляризованным по кругу, причем

наиболее преломляемая поляризуется в направлении тока, а другая — в противоположном направлении.

Спектральные линии, разлагаемые магнитным полем, в виде нормального триплета Зеемана, испускаются, следовательно, отрицательными электронами. Предусмотренные, таким образом, два составляющих дуплета должны быть, как показывает простое вычисление, равно отстоящими от первоначальной линии в шкале частот; разность их частот и частоты первоначальной линии равна для обоих $\frac{He}{rm}$.

Следовательно, опытным путем посредством измерения расщепления, возникающего под действием данного магнитного поля H, можно определить отношение $\frac{e}{m}$ — заряда к массе для электронов, испускающих свет. Как установлено, эти электроны как по величине этого отношения, так и по их заряду совершенно тождественны катодным частицам. Отношение $\frac{e}{m}$, выведенное из явления Зеемана при помощи вышеуказанной формулы, совпадает в нормальном триплете с отношением, соответствующим катодным лучам. Весьма замечательно, что для более сложных форм явления Зеемана изменения частот, вследствие действия магнитного поля, находятся в простых отношениях с изменением, соответствующим нормальному триплету.

Несмотря на наличие довольно простых отношений и на усилия Лоренца, Ритца и др., все же на основании положений электронной теории до настоящего времени еще не удалось сделать полного и удовлетворительного вывода о сущности чрезвычайно сложного изменения, которому подвергается большая часть спектральных полос вследствие действий магнитного поля на испускающий их источник*.

Таким образом, мы сталкиваемся с первым примером трудностей, которые возникают при попытке применить электромагнитную теорию, дополненную гипотезой электронов, к внутриатомным явлениям и их следствию — лучеиспусканию.

Избирательное поглощение. Наличие в материи движущихся электронов обеспечивает ей возможность не только испускать лучи, но и поглощать проходящее через нее излучение. Электромагнитное поле волны действует на эти электроны силами, по-

* Полную теорию эффекта Зеемана удалось построить лишь на базе современной квантовой механики. Коренному пересмотру подверглись и представления о механизме излучения света атомами. Выяснилось, что электроны испускают свет только при скачкообразном изменении своего состояния, соответствующем перескоку с одной орбиты на другую. Движение электрона, соответствующее в прежних представлениях движению по стационарной орбите, несмотря на наличие ускорения, не сопровождается излучением. — *Прим. ред.*

средством которых энергия излучения превращается в энергию движения электронов и затем, несколько позже, посредством толчков, — в энергию теплового движения атомов. Электроны, находящиеся в упорядоченном периодическом движении и послужившие для объяснения избирательного испускания спектральных линий, объясняют также — посредством явления резонанса — явление избирательного поглощения излучений с периодом, равным периоду их собственного движения. Всякое действие, как, например, действие внешнего магнитного поля, изменяющее периоды, свойственные этим внутриатомным движениям, изменяет положение линий спектров поглощения. Такое действие вызывает, следовательно, явление Зеемана. Это предположение полностью соответствует результатам опытов, проведенных Жаном Беккерелем на кристаллах и Дюфуром на газах. Однако в данном случае явления расщепления часто оказываются гораздо более сложными, чем в спектрах излучения.

Диамагнетизм. Гипотеза Лоренца об электронах, подвергнутых действию, пропорциональному расстоянию, приводит к чрезвычайно простой теории явления Зеемана, так как период движения в этом явлении совершенно независим от начальных условий. В этом случае не обязательно изучать, что́ именно происходит во время образования магнитного поля; вполне достаточно лишь сравнить периоды до и после возникновения этого поля, не занимаясь рассмотрением возможных изменений радиусов орбит.

Учитывая действие электрического поля, наведенного во время изменения магнитного поля, я смог доказать, что результат, полученный Лоренцем, продолжает сохранять свое значение, каков бы ни был закон силы, удерживающий электрон на круговой траектории, и что радиус орбиты электрона не изменяется вследствие возникновения магнитного поля; изменяется только скорость обращения. По закону Лоренца, эта скорость варьирует под действием наведенного электрического поля следующим образом: для отрицательного электрона, обращающегося в направлении тока, создающего магнитное поле, она увеличивается, а для отрицательного электрона, обращающегося в противоположном направлении, уменьшается. Из этого следует, что во всех случаях изменение частоты $\frac{He}{rm}$ соответствует результатам Лоренца.

Полученный результат объясняет, кроме того, диамагнитные явления, по крайней мере в простом случае центральных действий, и показывает, что они связаны с явлением Зеемана. Действительно, магнитное поле, созданное движущимся электроном вследствие наличия скорости, примерно такое же, какое произвел бы ток, циркулирующий по орбите, т. е. элементарный ток

Ампера. Из вышеизложенного следует, что возникновение магнитного поля изменяет лишь силу этих токов, пропорциональную скорости движения электронов, не изменяя их формы. Иначе говоря, магнитное поле изменяет только магнитные моменты, и, как показывают сформулированные правила, оно уменьшает моменты в направлении магнитного поля и увеличивает их в противоположном направлении. Если результирующий магнитный момент частичных токов, находящихся в одном атоме, при отсутствии внешнего магнитного поля, равен нулю, то при возникновении этого поля атом получит магнитный момент с направлением, противоположным направлению поля; иначе говоря, поле будет поляризовать вещество в диамагнитном отношении. Это объяснение проверяется также количественно и показывает, каким образом незначительность диамагнитных явлений является следствием малости атомных размеров.

Парамагнетизм. Если элементарные токи, находящиеся в атоме, имеют результирующий момент, отличный от нуля, то вещество, состоящее из большого числа этих молекулярных магнитов, вследствие беспорядочного теплового движения не обнаружит при отсутствии внешнего магнитного поля никакого результирующего момента, никакого общего намагничения, поскольку атомы обладают безразлично всеми возможными ориентациями. Когда же возникает поле, то появляется эффект, который не возникал в предыдущем случае, где результирующий момент каждого атома был равен нулю. Магнитное поле стремится ориентировать каждый молекулярный магнит по своему направлению. При отсутствии теплового движения все эти маленькие магниты расположились бы параллельно друг другу и вещество приобрело бы интенсивное намагничение. Вращательные движения, энергия которых возрастает с повышением температуры, сопротивляются этой тенденции, и магнитному полю удается лишь обеспечить преобладание ориентации, которой оно благоприятствует, причем степень этого преобладания усиливается с увеличением его интенсивности и с понижением температуры. Это и есть объяснение явлений парамагнетизма *. На это намагничение в направлении внешнего магнитного поля, обусловленное ориентацией молекулярных магнитов, налагается диамагнетизм, являющийся, как уже сказано, следствием изменения движения электронов по их орбите под действием внешнего поля. Однако этот диамагнетизм скрыт другим гораздо более интенсивным эффектом — парамагнетизмом.

Наконец, Вейсс показал, каким образом параллельная ориентация молекулярных магнитов может быть в значительной мере

* Об этом подробнее говорится в работе Ланжевена «Кинетическая теория магнетизма и магнетоны» (стр. 101). — *Прим. ред.*

облегчена посредством их взаимодействий; этим путем он пришел к объяснению ферромагнитных свойств *.

Распространение волн в материи. Как мы уже видели, распространение волн в пустоте происходит всегда с определенной скоростью, равной 300 000 *км/сек,* независимо от возмущения, создающего эти волны; иначе говоря, в пустоте не происходит дисперсии. Периодические волны распространяются с одинаковой скоростью, независимо от периода. Это простое явление распространения волн в пустоте вскрывает только два основных свойства эфира, выраженные двумя соотносительными законами о взаимном образовании электрического и магнитного полей. Если излучение проходит через материю, то вопрос усложняется вследствие наличия в ней наэлектризованных центров.

Рассмотрим, прежде всего, наиболее простой случай прохождения периодической волны через прозрачную среду, т. е. через среду, в которой ни малейшая часть падающей энергии не преобразуется — при посредстве толчков, возбужденных волной электронов, — в излучение разных периодов и в конце концов в излучение другого периода или же в тепловое движение. Предположим, что имеются лишь электроны, связанные с положением равновесия, т. е. такие, какие мы представляем себе в различных изолирующих средах.

Действуя на эти электроны своими электрической и магнитной силами, падающая волна приводит их в движение, сообщает им ускорения, вследствие чего они начинают сами испускать излучение. Наложение образованного таким образом бесчисленного количества маленьких волн на первоначальную волну и создает сложность оптических явлений в различных материальных средах.

Предположим, прежде всего, что падающий поток волн ограничен спереди фронтом, который распространяется в пустоте со скоростью света. Этот фронт будет продолжаться в материальной среде, где электроны занимают незначительный объем, и распространяться в ней с той же скоростью, но с прогрессивно убывающей интенсивностью. Действительно, электроны, которых достигает фронт волны, получают ускорение в направлении электрического поля, существующего во фронте волны. Возникающие при этом маленькие сферические волны имеют своей огибающей этот фронт волны и создают, следуя закону, связывающему излучение с ускорением, электрическое и магнитное поля, направление которых противоположно направлениям электромагнитных полей падающего излучения. В результате мы имеем прогрессивное ослабление энергии фронта волны.

* Путь к глубокому пониманию явлений ферромагнетизма был открыт впервые в современной квантовой механике. — *Прим. ред.*

Если поток волн течет регулярно, то очень скоро устанавливается постоянный режим, при котором каждый электрон принимает периодическое движение того же периода, что и падающее излучение, и производит излучение того же периода во всех направлениях. Поскольку этот механизм не способен испускать излучения какого-либо другого периода, то происходит не поглощение, а лишь изменение направления распространения лучистой энергии, обусловленное совокупностью всех маленьких волн, испускаемых электронами. Согласно указанию Максвелла, изолирующие среды, таким образом, являются одновременно и прозрачными средами.

Если распределение материальных молекул совершенно правильное, как, например, в кристаллической решетке, то маленькие волны складываются лишь в *одном или двух направлениях*, точно определенных в каждой одно- или двупреломляющей среде, в зависимости от ее внутренней симметрии. По другим направлениям эти волны в точности компенсируются посредством взаимной интерференции.

Волна, достигающая какой-либо точки, прошла в материи сложный путь; она является результатом наложения на падающую волну не только маленьких волн, порожденных непосредственно ею самой, но и всего того, что производят эти маленькие волны при посредстве того же механизма, и т. д. до бесконечности. При этих условиях понятно, что длина волны, т. е. кратчайшее расстояние между двумя местами, в которых среда находится в одном и том же состоянии, будет несколько иной в материальной среде, нежели в пустоте, при одном и том же периоде действующего возбуждения.

Частное от деления этой длины волны на период представляет собой так называемую фазовую скорость, равную в пустоте скорости фронта волны и, как правило, меньшую в веществе. Отношение двух скоростей дает показатель преломления, соответствующий рассматриваемому периоду. Именно это и определяет (при прохождении потока периодических волн через поверхность раздела двух сред) изменение в направлении распространения и показывает, каким образом падающая энергия делится между излучением, проходящим через поверхность, и излучением, отражающимся обратно в первую среду.

Легко понять, каким образом эта отраженная волна соответствует наложению в вышеуказанной первой среде всех маленьких волн, испущенных зернами электричества, находящимися во второй среде и приведенными в движение падающей волной. Что касается второй среды, то мы уже указывали, каким образом наложение этих маленьких волн на падающее излучение вызывает появление одного или двух преломленных лучей.

Теперь совершенно ясно, откуда происходит дисперсия, т. е. изменение в материальной среде фазовой скорости в зависимости от периода, а следовательно, и от явления отражения и преломления, определяющихся этой дисперсией. Каждая наэлектризованная частица, связанная с положением равновесия, имеет собственный период колебания вокруг данного положения, определяющийся ее массой и прочностью связи, удерживающей ее в положении равновесия. Под действием периодически изменяющегося электрического поля падающей волны частица принимает в качестве постоянного режима вынужденное движение с периодом, равным периоду падающего излучения, с амплитудой и фазой, изменяющимися в зависимости от удаления этого периода от собственного периода свободных движений электрона, согласно общей теории явлений резонанса. В этих условиях амплитуда и фаза маленьких волн, излучаемых электронами, по отношению к соответствующим элементам падающего излучения изменяются в зависимости от периода этого излучения. Отсюда вытекает явление дисперсии, в котором основную роль играют собственные периоды свободных колебаний наэлектризованных центров около их положения равновесия, периоды, изменяющиеся от одного вещества к другому.

Для определенного собственного периода значение волн, испускаемых электроном под действием излучения данного периода и амплитуды, увеличивается с увеличением заряда электрона, которому пропорциональна внешняя сила, созданная волной, и уменьшается в зависимости от массы электрона, которой обратно пропорционально получаемое ускорение. Таким образом, теоретический закон дисперсии принимает во внимание для каждого собственного периода как число наэлектризованных частиц в молекуле, которые соответствуют этому периоду, так и отношение их заряда к их массе.

Сопоставление теоретических формул с экспериментальным законом дисперсии дает возможность определить не только собственные периоды, но также и количество и природу наэлектризованных частиц для каждого собственного периода, как это показал Друде.

Наиболее замечательным результатом этого сопоставления является следующее: для всех рассмотренных прозрачных веществ периоды ультрафиолетовых собственных колебаний представляют собой результат присутствия в каждой молекуле электронов, тождественных — с точки зрения отношения их заряда к их массе — катодным корпускулам и количественно равных числу химических валентностей атомов, образующих молекулу. Дисперсия, так же как и явление Зеемана, подтверждает положение о том, что катодные корпускулы представляют собой общий составляющий элемент всех материальных атомов. Спра-

ведливость вышеуказанного положения подтверждается также открытым Фарадеем явлением вращения плоскости поляризации под влиянием магнитного поля. Нижеследующее доказывает тесную связь этого явления с явлением Зеемана и диамагнетизмом.

В результате действия внешнего магнитного поля, как мы уже видели в самом простом случае, собственные периоды электронов изменяются; частота, соответствующая круговым движениям, увеличивается или уменьшается на $\frac{He}{2m}$ в зависимости от направления обращения. Согласно теории дисперсии, для данного периода падающего излучения любое изменение в периоде собственных колебаний должно выражаться изменением показателя преломления, т. е. изменением в скорости распространения фазы. Из этого следует, что при наличии магнитного поля два луча, распространяющиеся в направлении силовых линий поля, имеющие тот же период и поляризованные по кругу в противоположных направлениях, будут распространяться неодинаково: один из них заставит электроны вращаться в направлении увеличения собственной частоты, а другой — в направлении, соответствующем уменьшению этой же частоты.

Известно, что для двух вращений, на которые можно разложить любое излучение, поляризованное прямолинейно, эта разница между скоростями фазы выражается вращением плоскости поляризации. Теоретическая формула, выражающая вышеприведенное положение, дала возможность Сиертсему показать, что электроны, порождающие магнитную вращательную силу, тождественны катодным корпускулам.

Прежде чем рассматривать, каким образом излучение может раскрыть не только отношение заряда к массе, но и абсолютную величину заряда, а следовательно, и массу находящихся в материи наэлектризованных частиц, мне бы хотелось сказать несколько слов о различных скоростях, возникающих при распространении излучения в различных материальных средах.

В пустоте, где не существует дисперсии, имеется лишь одна скорость. Всякое возмущение распространяется там без изменения со скоростью 300 000 *км/сек*. В веществе же, напротив, мы установили наличие двух скоростей: скорости фронта волны и скорости фазы. Фронт волны в веществе распространяется с той же скоростью, как и в пустоте, но с амплитудой, уменьшающейся настолько быстро, что после короткого пути она уже становится совершенно незаметной. Явно обнаружить это распространение фронта через любое вещество можно только при наличии сильно проникающих излучений, как, например, лучей Рентгена и γ-лучей. Явления преломления света или интерференции, соответствующие постоянному режиму распространения потока

периодических волн, дают возможность установить лишь скорость распространения фазы.

Всякое изменение в правильности падающего излучения, а также всякое изменение в амплитуде периодического явления будет распространяться в различных материальных средах с третьей скоростью, отличной от двух предыдущих и, как показали Рэлей и Гуи, являющейся скоростью распространения одной амплитуды или групповой скоростью. Эта скорость определяется законом дисперсии. Она может быть получена при помощи прямых измерений скорости света, например по методу, предложенному Фуко и примененному им к распространению волн в различных материальных средах.

Синева неба. До сих пор мы предполагали, что распределены молекулы в материальной среде достаточно равномерно, чтобы маленькие волны, испущенные каждой молекулой, могли взаимно компенсироваться посредством наложения во всех направлениях, кроме направления распространяющейся волны. Если вследствие теплового движения в этом распределении появляются различные неправильности, флюктуации, соответствующие законам случайности, то компенсации не будет, а произойдет диффузия света по всем направлениям; она порождает синюю окраску, которую принимает атмосфера при прохождении через нее солнечного излучения, если смотреть на нее не по направлению распространения излучения. Этим же путем образуется опалесценция в жидкостях вблизи критической точки. Как в одном, так и в другом случае создаются благоприятные условия для возникновения неравномерностей в распределении молекул.

В газах, и в частности в воздухе, где общий объем довольно значителен сравнительно с объемом, действительно занимаемым молекулами, последние имеют место для свободного движения и образуют местные сгущения и разрежения, согласно законам случайности.

Чтобы обнаружить вытекающий из этого эффект и предвидеть свойства света, диффузно рассеиваемого небом, возьмем простой случай, когда наблюдение производится в направлении, перпендикулярном к направлению солнечных лучей. Мы можем разложить долю этого излучения, соответствующего длине волны λ, на две части: одну, поляризованную прямолинейно в плоскости, проходящей через направление визирования, и другую — той же амплитуды, поскольку излучение является естественным *, — поляризованную в плоскости, перпендикулярной к плоскости визирования.

Для второй части электрическое поле, перпендикулярное пло-

* Естественным называется свет, направление светового вектора которого постоянно и беспорядочно меняется. В среднем любые две его взаимно перпендикулярные составляющие имеют равные амплитуды. — *Прим. ред.*

скости поляризации, находится в направлении визирования, так же как и ускорения, сообщаемые им электронам.

Как мы видели, электрон, испытывающий ускорение, ничего не излучает в направлении ускорения: наблюдатель, следовательно, не получит никакого рассеянного света, соответствующего второй части солнечного излучения. Первая же часть, для которой электрическое поле перпендикулярно к плоскости поляризации, образуемой направлением визирования и направлением, проходящим через Солнце, вызовет появление ускорений и, следовательно, электрического поля в направлении визирования для маленьких волн, испускаемых электронами.

Все эти поля, образованные индивидуально электронами, находящимися в молекулах воздуха, будут иметь одно направление, но различные знаки в один и тот же момент, в зависимости от расстояния электронов от глаза наблюдателя. Если они взаимно не компенсируются, вследствие неравномерности распределения молекул, их результирующая неизбежно будет иметь общее направление; иначе говоря, свет, идущий с неба в направлении, перпендикулярном к направлению солнечного света, должен быть поляризован в плоскости, образуемой направлением визирования и направлением, проходящим через Солнце.

Эти выводы сделаны на основании практических наблюдений. Теория в соответствии с фактами предусматривает также частичную поляризацию небесного света в направлениях, не совпадающих с направлением солнечных лучей.

Сравним энергию, излученную в направлении визирования электронами, содержащимися в N молекулах элемента объема, с энергией, излучаемой ими по основному направлению распространения. В последнем направлении маленькие волны когерентны *, все их электрические поля равны между собой, их сумма пропорциональна N, и, следовательно, излученная энергия, пропорциональная квадрату поля, пропорциональна N^2. В исследуемом направлении приходящие маленькие волны имеют одну и ту же амплитуду, но фазы распределены случайно, соответственно распределению молекул. Закон вероятностей показывает, что наиболее вероятная величина для суммы N равных элементов, но со знаками, распределенными случайно, пропорциональна $\sqrt{N}$. Энергия, излученная в этом направлении и пропорциональная квадрату амплитуды, будет пропорциональна N. Из этого следует очень важный вывод о том, что отношение между блеском неба и блеском Солнца пропорционально $\frac{N}{N^2}$, т. е. обратно пропорционально числу молекул, содержащихся в данной массе газа. Экспериментальное сравнение двух яркостей — солнеч-

* То есть таковы, что разности фаз их неизменны. — *Прим. ред.*

ной и небесной — дает, следовательно, непредвиденное средство раскрыть молекулярное строение вещества; свет, диффузно рассеиваемый атмосферой, должен быть тем более интенсивным, чем крупнее молекулярное зерно, т. е. чем меньше число N. Величины, полученные посредством этого способа для постоянной Авогадро, для числа молекул в грамм-молекуле, полностью совпадают с величинами, вычисленными другими способами. Свет рассеянный, дающий число Авогадро, позволяет тем самым вычислить атомный заряд, т. е. заряд e электрона.

Наконец, нетрудно обнаружить, что часть солнечного света, рассеянного атмосферой, изменяется в обратном отношении к четвертой степени длины волны и является, следовательно, гораздо более значительной на синем конце, чем на других, менее преломляемых участках спектра, так что синева преобладает в диффузном излучении.

Обозначим посредством $A \sin 2\pi\nu t$ электрическое поле падающего излучения частоты ν, находящееся в какой-то определенной точке среды. Энергия этого падающего излучения пропорциональна квадрату A^2 амплитуды электрического поля. Действуя на электрон, связанный с положением равновесия, это поле определяет перемещение, пропорциональное своей интенсивности, по крайней мере, в том случае, когда инерция электрона не играет значительной роли, т. е. когда собственный период обращения электрона мал по сравнению с собственным периодом излучения. Последнее относится к воздуху, закон дисперсии которого учитывает лишь собственные периоды, расположенные очень далеко в ультрафиолетовой области, а также, говоря более обобщенно, для веществ, которые, как и воздух, удовлетворяют — для периода рассматриваемого излучения — соотношению, выведенному Максвеллом, между диэлектрической постоянной и квадратом показателя преломления.

Если перемещение пропорционально действительной величине поля $A \sin 2\pi\nu t$, то ускорение электрона, даваемое второй производной перемещения по отношению ко времени, пропорционально величине $A\nu^2$. Энергия, рассеянная в косом направлении, будет для данного распространения молекул пропорциональна квадрату ускорения, т. е. $A^2 \nu^4$. Таким образом, отношение рассеянной энергии к падающей энергии пропорционально четвертой степени частоты, т. е. обратно пропорционально четвертой степени длины волны.

Следовательно, теория дает возможность объяснить — качественно и количественно — все свойства света, диффузно рассеиваемого атмосферой, именно состояние поляризации, интенсивности и спектральный состав.

Тепловое излучение. При изучении строения спектра черного излучения мы сможем обнаружить новый способ выявления

индивидуального заряда зерна электричества. Однако при этом мы встретимся с еще более явными трудностями, чем при изучении явления Зеемана.

Как стало известно после работ Кирхгофа, внутри определенной замкнутой полости при термическом равновесии по всем направлениям распространяются излучения, причем интенсивность для каждой длины их волн независима от природы вещества, из которого сделаны стенки полости. Этот результат, соответствующий положениям термодинамики, предполагает наличие связи между испускательной и поглощательной способностью материи для каждой длины волны излучения. Установление равновесия излучения, с определенной плотностью энергии для каждого участка спектра, требует, чтобы находящееся в полости вещество было способно одновременно испускать и поглощать соответствующие лучи. Испускание без поглощения повлекло бы за собой безграничное накопление, а поглощение без испускания — прогрессивное исчезновение энергии. При наличии обоих свойств устанавливается постоянный режим, подчиненный условию, чтобы даже для самого маленького участка спектра испущенное в какой-либо данный отрезок времени излучение точно компенсировало поглощенное излучение. Когда равновесие достигнуто, то наличное излучение будет тем более интенсивным, чем больше испускательная способность и чем слабее поглощательная, или, выражаясь более точно: плотность наличной лучистой энергии определяется отношением испускательной способности к поглощательной. Следовательно, для обеспечения независимости теплового излучения от природы вещества необходимо, чтобы отношение испускательной способности к поглощательной для каждой длины волны было бы одно и то же для всех тел при одинаковой температуре.

Каждый механизм, благодаря которому можно объяснить обмен энергией между веществом и эфиром посредством испускания и поглощения света, должен дать нам возможность вычислить соответствующие ему испускательные и поглощательные способности, а следовательно, и предвидеть интенсивность теплового излучения внутри данного объема при температурном равновесии. При этом результат должен быть независим от рассматриваемого механизма.

Наличие свободных электронов, например таких, благодаря которым металлы приобретают свойство проводимости, раскрывает нам простой механизм испускания и поглощения.

Если предположить, что при какой-либо данной температуре электроны, находящиеся в металле, движутся, соответственно общим принципам кинетической теории, со средней живой силой, равной живой силе газовой молекулы при той же температуре, и что каждый электрон испытывает непрерывные удары об атомы

металла, тогда ускорения, соответствующие этим ударам, обусловят излучения соответственно общему закону, связывающему излучение волн с ускорением. Таким образом, полное излучение, испускаемое металлической пластинкой, становится известным благодаря содержащимся в ней свободным электронам; разложив это излучение в ряд по методу Фурье, мы можем вычислить для каждой длины волны испускательную способность пластинки при рассматриваемой температуре.

Лоренц выполнил этот расчет для излучений с длинным периодом волн по отношению к средней продолжительности свободного пробега электронов между двумя столкновениями с атомами. В полученное выражение для испускательной способности входит число электронов на единицу объема, их скорость и средняя продолжительность свободного пробега. С другой стороны, поглощательная способность пластинки обусловлена, как мы уже видели, тем, что электрическое поле, находящееся в падающей волне, действует на свободные электроны металла и создает там токи, а это вызывает увеличение силы ударов, которые нагревают металл за счет падающей энергии. Коэфициент поглощения определяется проводимостью металла, которую можно вычислить, исходя от числа свободных электронов, их средней скорости движения и длины их свободного пробега.

Элементы, изменяющиеся в зависимости от природы металла, исчезают, как этого требует термодинамика, когда выводится частное от деления коэфициента испускания на коэфициент поглощения для одной и той же длины волны λ. Отсюда для объемной плотности лучистой энергии, заключенной между двумя длинами волны λ и $\lambda + d\lambda$ внутри полости при тепловом равновесии и температуре T, получается выражение

$$\frac{8\pi RT}{N\lambda^4}\, d\lambda, \tag{5}$$

где R — постоянная идеальных газов для грамм-молекулы и N — число Авогадро. Выведенный таким образом закон, известный под названием закона Рэлея — Джинса, точно соответствует случаям для больших длин волн: он представляет собой тепловое излучение в инфракрасной области. Посредством сравнения формулы с опытом можно определить число N и затем, следовательно, заряд электрона e.

Весьма замечательно, что измерения интенсивностей теплового излучения, испускаемого некоторой полостью при температурном равновесии, дают возможность вычислить прямым путем абсолютную величину зерна электричества. Причину этого обстоятельства можно понять на основании вышеизложенного. Ускорение электронов, находящихся в металле, определяется тепловым движением, интенсивность которого, полностью опре-

деленная температурой, независима от заряда, несомого электроном. По формуле (4), излученная энергия изменяется с изменением заряда e пропорционально его квадрату. Таким образом, при прочих равных условиях, испускательная способность металла пропорциональна квадрату индивидуального заряда содержащихся в нем электронов. С другой стороны, проводимость металла, которой пропорциональна поглощательная способность, изменяется, как и заряд электрона, т. е. как сила, с которой действует на него электрическое поле, создающее ток. Отношение испускательной способности к поглощательной, а следовательно, и плотность теплового излучения, пропорционально индивидуальному заряду электронов, атомному заряду, т. е. обратно пропорционально числу Авогадро.

Выводимый из термодинамики факт, что плотность излучения должна быть независима, при данной температуре, от вещества, из которого состоит полость, требует, следовательно, чтобы свободные электроны имели одинаковый заряд независимо от вещества, которое их содержит. В противном случае термодинамическое равновесие было бы невозможно.

К несчастью, согласие между теорией и опытом нарушается при переходе к коротким волнам, или, точнее говоря, к малым значениям произведения λT — длины волны на температуру. И действительно, применение более общих методов статистической механики, чем метод, основанный на рассмотрении испускательной и поглощательной способности свободных электронов, показало, что электромагнитная теория, в соединении с гипотезой электронов в форме, развитой Лоренцем, предусматривает для всех длин волн плотность излучения, определенную формулой (5). Этот результат находится в явном противоречии с фактами. Прежде всего, он предусматривает плотность энергии в спектре, постоянно возрастающую с уменьшением длины волны; более того, если рассматривать все длины волн — от бесконечности до нуля, то для полного спектра получается бесконечная плотность энергии теплового излучения при любой температуре.

Опыт же, напротив, показывает, что плотность энергии в спектре проходит через максимум для длины волны, обратно пропорциональной абсолютной температуре, согласно закону Вина *; и нам хорошо известно, что общая энергия излу-

* «Закон смещения» Вина связывает температуру T с длиной волны излучения λ_{max}, на которую приходится максимальная плотность энергии в спектре черного тела, соответствующем этой температуре. Он выражается формулой

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{const}.$$

Важное значение для вывода этого закона имели исследования русского физика В. А. Михельсона, получившего соотношение $\lambda_{max} \cdot T^2 = \text{const}$; Вин уточнил анализ Михельсона. — *Прим. ред.*

чения внутри замкнутой полости при тепловом равновесии конечна.

Эти трудности, которые Планк попытался разрешить посредством введения квантов энергии, показали, что мы еще не знаем действительных законов, которые управляют движением электронов внутри атомов *. В отношении же их существования и законов их движения в свободном состоянии не существует никаких сомнений.

Тот факт, что трудности появляются только для наиболее сложных форм явления Зеемана и для малых длин волн в теории черного излучения, показывает, что электроны действительно являются посредниками между материей и излучением, но что основные законы их связи с атомами от нас еще ускользают.

IV. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДИНАМИКА

Мы уже отметили наличие параллелизма между явлениями самоиндукции и инерции, обусловленного тем, что при самоиндукции конвекционного тока возникают противодействия, сильно напоминающие противодействия инерции. Эту аналогию можно рассматривать, во-первых, с точки зрения обмена энергии и, во-вторых, с точки зрения взаимодействия, посредством которых осуществляются эти обмены.

Что касается обмена энергии, то известно, что движущаяся наэлектризованная частица, скорость которой v достаточно мала по сравнению со скоростью света, окружает себя магнитным полем, представляющим собой энергию, пропорциональную квадрату скорости, в то время как электрическое поле остается таким же, как и при состоянии покоя.

Чтобы привести частицу в движение, необходимо, поскольку она наэлектризована, сообщить ей энергию, равную энергии появившегося магнитного поля и пропорциональную квадрату скорости. И наоборот, эта энергия должна быть возвращена обратно в момент остановки.

Электрический заряд обеспечивает частице способность накапливать — при сообщении ей движения — энергию, изменяющуюся со скоростью так же, как и кинетическая энергия. Иначе

* Действительно, эти законы, как выяснилось впоследствии, глубоко отличны от обычных законов классической механики и электродинамики и отражают внутренне противоречивую корпускулярно-волновую природу материи. Гипотеза Планка, о которой упоминает Ланжевен, была первой попыткой ввести квантовые представления в теорию излучения. Планк предположил, что излучающие центры вещества могут испускать и поглощать энергию не непрерывно, а только дискретными порциями. Это предположение позволило Планку получить точный закон распределения энергии по спектру излучения и устранить то противоречие теории с опытом, о котором говорил Ланжевен выше. — *Прим. ред.*

говоря, частица обладает электромагнитной массой вследствие своей наэлектризованности. Эта электромагнитная масса может присоединяться к инерции несколько иной природы, чем та, которая существует вокруг частицы, но может также существовать и отдельно, как это, повидимому, имеет место для катодных корпускул; эти корпускулы инертны просто потому, что они наэлектризованы.

Простое вычисление показывает, что для наэлектризованной частицы, заряд e которой равномерно распределен на поверхности сферы радиуса a, величина энергии магнитного поля равняется (в электромагнитных единицах CGS)

$$\frac{e^2}{3a} v^2.$$

Уподобление этой энергии, связанной с движением кинетической энергии $\frac{1}{2} mv^2$, дает для соответствующей электромагнитной массы:

$$m_0 = \frac{2e^2}{3a^2}.$$

То, что нам известно об отношении между излучением, испускаемым неравномерно движущейся частицей, и ускорением этого движения, позволяет точно определить механизм явлений инерции, по крайней мере, в электромагнитной части.

Предположим, что в момент t частица уже давно находится в равномерном движении со скоростью v. На любом расстоянии величина окружающего ее магнитного поля соответствует этой величине скорости, и совокупное ее распределение представляет энергию, равную в целом $\frac{e^2}{3a} v^2$. Если в момент t частица испытывает приращение скорости, то необходимо, чтобы электромагнитный след был целиком изменен и чтобы магнитное поле имело на любом расстоянии величину, соответствующую новой скорости, если последняя остается постоянной. Это не может произойти мгновенно, так как изменение следа может распространяться в эфире лишь со скоростью света V, начиная от наэлектризованного центра, испытывающего ускорение γ.

Волна ускорения, испущенная центром в момент изменения скорости, производит на расстоянии это изменение электромагнитного следа и, так сказать, сообщает удаленным участкам об изменении скорости, которое испытывает центр. Прогрессивно расширяясь и захватывая, таким образом, все пространство, она приносит в каждый участок следа энергию, необходимую для увеличения силы магнитного поля, как этого требует изменение скорости центра.

Вычисление показывает, что волна ускорения уносит при своем выходе из центра не только собственную энергию

$$\frac{2}{3V}e^2\gamma^2dt,$$

которую она переносит в бесконечность в виде излучения, но также, вследствие своего наложения на след, — энергию, равную приращению кинетической энергии следа. По пути она распределяет эту последнюю, встречая перед собой прежний след и оставляя позади себя новый след, соответствующий новой скорости.

Таким образом, волна ускорения является как бы посредником, при помощи которого наэлектризованная частица, вследствие изменения собственной скорости, постепенно изменяет окружающий ее след со скоростью распространения света.

Внешняя сила, действующая на частицу и производящая изменение скорости, должна, следовательно, доставить волне ускорения в момент ее выхода не только увеличение кинетической энергии, но также и излучаемую энергию, как бы отдавая дань этой вспомогательной волне за оказанную услугу.

При обычных условиях излучаемая энергия представляет, по сравнению с изменением кинетической энергии, очень малую величину; так что изменением обычных законов механики, вытекающим из наличия излучения, можно пренебречь.

Вышеприведенный анализ показывает, насколько в действительности сложно явление инерции, рассматривавшееся раньше как фундаментальное и простое свойство материи. Замечательная черта современной концепции состоит в том, что она показывает наличие тесной взаимосвязи между такими, кажущимися на первый взгляд совершенно различными, явлениями, как явления инерции, электромагнетизма и лучеиспускания.

Если теперь стать на другую точку зрения, на точку зрения реакции частицы на изменение скорости, то опять-таки станет очевидной существенная роль излученной волны ускорения.

В момент изменения скорости каждый из элементов, на которые можно разложить заряд электрона, испускает волну, распространение которой на другие элементы заряда вызывает появление на них сил электромагнитного характера.

Вычисление показывает, что совокупность всех порожденных таким образом маленьких сил не равна нулю. В простом случае сферического электрона эта совокупность представляет одну равнодействующую силу, главным членом которой является $-\frac{2e^2\gamma}{3a}$, т. е. силу инерции обычной механики, равную и противоположную произведению электромагнитной массы m_0 на ускорение γ. Именно посредством этой силы частица «заим-

ствует» у внешних источников, действие которых изменяет ее скорость, энергию, необходимую для изменения ее следа, для увеличения ее кинетической энергии. Существует еще дополнительная сила, посредством которой излученная энергия «заимствуется» у внешних источников, а именно — реакция излучения, которую классическая динамика оставляет в стороне.

В том случае, когда ускорение изменяется во времени не слишком быстро, реакция излучения имеет величину

$$\frac{2e^2}{3V}\frac{d\gamma}{dt};$$

обычно она очень мала сравнительно с силой инерции.

Уже с этой точки зрения обычные уравнения динамики, где не фигурируют ни реакция излучения, ни соответствующая ей излучаемая энергия, являются первым приближением, вообще говоря, достаточно точным вследствие большой величины скорости света V, которая находится в знаменателе выражения реакции излучения и излучаемой энергии. Мы имели бы здесь в точности обычную механику, если бы эта скорость распространения была бесконечна, если бы изменения скорости наэлектризованного центра передавались мгновенно самым удаленным участкам следа и если бы созданные частицей электрическое и магнитное поля мгновенно принимали на любом расстоянии величины, определенные скоростью частицы в данный момент.

Первое различие между электромагнитной и классической динамикой, характеризующееся наложением реакции излучения на силу инерции или наложением излученной энергии на увеличение кинетической энергии, имеет своей глубокой причиной предельную скорость распространения возмущений в среде; это значит, что изменение электромагнитного следа, требуемое любым изменением скорости частицы, распространяется постепенно от точки к точке, или что инерция материи — явление не мгновенное.

Эта же причина лежит в основе всех расхождений между новой и старой механикой, которые мы обнаруживаем и которые она делает непримиримыми. Именно: она требует, как мы это увидим при рассмотрении принципа относительности, изменений даже основных понятий пространства и времени.

Теперь нетрудно понять, насколько значительны и глубоки были последствия открытий Фарадея, когда он отбросил понятие о непосредственном и мгновенном действиях на расстоянии и обратил внимание на значение среды. Факт существования в этой среде предельной скорости распространения содержался уже (правда, еще в скрытом виде) в открытиях Фарадея, которые в первое время ограничивались только электрическими и магнитными явлениями. Максвелл раскрыл наличие этого факта и

показал, что предельная скорость равна скорости света. Таким образом, посредством электромагнитной теории была завоевана оптика; благодаря введению Лоренцем понятия о зерне электричества это завоевание распространяется в настоящее время на механику и доходит до основных понятий пространства и времени, видоизменяя их.

В 1881 г. Дж. Дж. Томсон впервые указал на возможность истолкования инерции с точки зрения электромагнетизма для случая малых скоростей по сравнению со скоростью света; это привело к надежде о возможности создания чисто электромагнитной динамики и (как сделал Максвелл в отношении света) объяснения сущности всех физических явлений, исходя из единственной основы — электромагнитных свойств эфира и наэлектризованных центров, образующих материю. С первого взгляда казалось, что эта надежда начала осуществляться полностью.

Аналогия между явлениями самоиндукции или взаимной индукции и явлениями инерции, установленная Максвеллом, привела его к попытке, противоположной указанной; выяснив, что уравнения индуцированных токов могут принять форму, в точности подобную форме уравнений, введенных Лагранжем в механику, Максвелл заключил, что электромагнитные явления могут быть объяснены механически.

Для разрешения проблемы, поставленной Максвеллом и считавшейся им разрешимой, были сделаны многочисленные попытки, именно: исходя из законов механики, рассматриваемых как основные, дать точное представление о свойствах эфира и электричества. Однако все эти попытки потерпели неудачу; больше того, несколько лет назад, в связи с принципом относительности, было установлено, наконец, что так оно и должно быть, потому что уравнения классической механики, с одной стороны, и уравнения, представляющие электромагнитные свойства эфира, — с другой, в действительности несовместимы, вопреки предположениям Максвелла, так как они не допускают одной и той же группы преобразований и не сохраняются для одних и тех же преобразований пространства и времени. Понятия пространства и времени, лежащие в основе классической механики, несовместимы с электромагнитной теорией; иначе говоря, механика предполагает мгновенными эффекты инерции, обмен действия и противодействия на расстоянии, между тем как электромагнетизм требует их распространения со скоростью света.

Это глубокое расхождение, являющееся источником других расхождений, исчезает в случае, рассматриваемом Максвеллом: уравнения, посредством которых обычно выражают законы индукции токов, точны лишь в первом приближении и применимы

только к медленно изменяющимся токам, потому что они не учитывают явлений распространения волн Герца и излучений энергии, связанных с изменением токов.

Уравнения наведенных токов оставляют в стороне именно то, чем точные уравнения электромагнетизма отличаются от уравнений механики; поэтому они и находятся в согласии с последними, как установил Максвелл. Это согласие исчезает, когда мы переходим к указанным выше точным законам электромагнетизма в форме, которая предполагает распространение любого возмущения с конечной скоростью света; выяснилось, что механическое истолкование этих законов невозможно и что так оно и должно быть.

Но если из электромагнетизма невозможно изъять распространение со скоростью света,что́ является его существенной особенностью и позволило ему завоевать оптику, то, наоборот, вполне возможно внести изменения в механику, как это мы показали в связи с инерцией, и притом именно такие изменения, которые согласуют ее с законами электромагнетизма, рассматриваемыми как более простые и принимаемыми за основу объяснений. Уравнения классической динамики для случая малых скоростей или ускорений являются для нас лишь приближенными, сохраняющими силу в том случае, когда явления излучения не играют никакой роли, и подлежащими изменению, когда излучение выступает в качестве важного фактора.

Таким образом, физики обратили проблему, поставленную Максвеллом, и попытались создать электромагнитную динамику, по отношению к которой обычная динамика является лишь приближением, основанным на допущении бесконечной скорости распространения, между тем как в действительности последняя равна скорости света. Большая величина скорости света делает приближение совершенно законным в большом числе ординарных случаев.

Обобщенный принцип Гамильтона. Вышеизложенный метод истолкования инерции может показаться недостаточно точным: он как будто приводит к электромагнитной теории механики, но понятие силы в нем использовано (правда, несколько иначе, чем в обычной динамике) таким образом, что это понятие можно определить, не прибегая к законам инерции, которые необходимо еще объяснить. Между тем за основу новой динамики (которую мы хотим создать) более правильно, казалось бы, взять исключительно электромагнитные и кинематические положения, независимые от того, с какой точки зрения рассматриваются силы и инерция. Заметим, однако, для логической точности, что основные понятия полей и зарядов могут быть введены исключительно статистическим путем, не прибегая к динамическому понятию инерции или к законам движения.

Наиболее простая исходная точка обобщения, или, точнее говоря, электромагнитного переложения принципа Гамильтона, для новой динамики аналогична принципу наименьшего действия.

Содержание принципа Гамильтона в динамике следующее: если материальная система имеет потенциальную энергию U и если T — ее кинетическая энергия, то путь, по которому движется (по законам механики) система между двумя моментами t_0 и t_1, для каждого из которых дана конфигурация системы, обладает свойством делать минимумом интеграл

$$\int_{t_0}^{t_1}(U-T)dt.$$

Еще Кельвин заметил, что распределение электростатического поля вокруг данных зарядов удовлетворяет тому, чтобы заключенная в диэлектрике энергия была минимумом, совместимым с присутствием зарядов. Более общие законы Максвелла и Герца, управляющие одновременно электрическим и магнитным полями, удовлетворяют условию аналогичного минимума: если предположить, что система электрических зарядов дана не только в покое, но и в движении между двумя моментами t_0 и t_1, то способ распределения электрического и магнитного полей в окружающем пространстве в течение времени удовлетворяет условию сведения к минимуму интеграла

$$I=\int_{t_0}^{t_1}(W_e-W_m)dt,$$

где W_e — энергия электрического поля, равная

$$\int\frac{K_0h^2}{8\pi},$$

а W_m — энергия магнитного поля, равная

$$\int\frac{\mu_0H^2}{8\pi}\,dv.$$

Чтобы вывести законы новой динамики, достаточно распространить этот принцип не только на возможные изменения в распределении полей, но также и на возможные изменения движения зарядов, наличие которых мы до сих пор предполагали.

Если мы предположим, что даны только распределения (в начальном и конечном моментах t_0 и t_1) наэлектризованных частиц, составляющих заряд, и попытаемся установить, каковы должны быть в указанном интервале их движения для того,

чтобы интеграл I был минимумом, то обнаружим законы движения, которые, при условии малых скоростей и медленных изменений, имеют точно такую же форму, как и обычные законы динамики; однако при больших скоростях или больших ускорениях полученные законы отклоняются от обычных законов динамики и притом тем значительнее, чем больше скорости приближаются к скорости света.

Но для вычисления этого минимума необходимо выдвинуть гипотезу о том, каким образом «ведет» себя каждый электрон, т. е. каждая наэлектризованная частица при изменении скорости.

Когда Макс Абрагам впервые систематически развил электромагнитную динамику, то наиболее простой ему показалась гипотеза, предполагающая абсолютную жесткость электрона и приписывающая последнему неизменную во время движения форму.

Здесь перед нами — кинематическая гипотеза, которая рассматривает лишь пространство и время и которая с первого взгляда показалась подходящей в качестве основы для новой динамики.

При малых скоростях результаты оказались теми же, какие мы уже получили при рассмотрении инерции; впрочем, они являются одними и теми же для всех форм электромагнитной динамики: сила инерции принимает свою обычную форму и обуславливает ускорение при помощи постоянной массы, определяемой зарядом и формой электрона; к нему прибавляется лишь реакция излучения.

Продольная и поперечная массы. Когда скорость частицы приближается к скорости света и ее изменения во времени относительно малы, то в реакции, которую оказывает частица изменению скорости, фигурирует сила инерции, пропорциональная ускорению; однако коэфициент пропорциональности, вместо того чтобы оставаться постоянным, как при малых скоростях, изменяется с изменением скорости и притом различным образом, в зависимости от направления ускорения по отношению к направлению движения. Таким образом, в наиболее простом случае, при сферическом электроне, необходимо различать две массы как функции скорости: продольную массу — частное от деления силы инерции на ускорение, когда последнее параллельно движению, и поперечную массу, которая соответствует случаю, когда ускорение нормально по отношению к траектории. Первый случай соответствует изменению величины скорости без изменения направления, а второй — изменению направления скорости без изменения ее величины.

Все изложенное нами относительно распределения полей в электромагнитном следе частицы при больших скоростях поможет уяснить необходимость введения массы как функции

скорости. Мы видели, что на электростатическое поле движущейся частицы налагается электрическое поле, наведенное изменениями магнитного поля, которое возникает при движениях частицы. Из этого следует, что дополнительная энергия, содержащаяся в следе благодаря движению, перестает быть пропорциональной квадрату скорости и увеличивается до бесконечности по мере приближения этой скорости к скорости света.

Следовательно, сила инерции, посредством которой у внешних источников заимствуется энергия, соответствующая изменениям следа, также должна перестать быть пропорциональной ускорению с постоянным коэфициентом. Коэфициент становится функцией скорости, и вычисление показывает, что он совпадает с продольной массой, выведенной из применения обобщенного принципа Гамильтона.

Формула Макса Абрагама для поперечной массы сферического неизменяющегося электрона вначале, казалось, была блестяще подтверждена прекрасными опытами Кауфмана над отклонениями β-лучей радия в электрическом и магнитных полях.

Сравнение двух отклонений, электрического и магнитного, дает возможность, как и в случае катодных лучей, измерить отношение заряда в массе частицы и ее скорость. Впрочем, понятно, что в этом случае проявляется только поперечная масса, которая соответствует отклонению, поскольку электрические и магнитные силы нормальны к направлению скорости в этих опытах.

Результат показал, что, в соответствии с теоретическими предсказаниями, отношение заряда к массе уменьшается с увеличением скорости. Количественное согласие было достаточно хорошее в пределах точности измерений; так что, повидимому, можно говорить о правильности точки зрения Макса Абрагама и тем самым оправдать надежду на возможность представить физические явления на чисто электромагнитной основе.

Электрон Лоренца. Несколько позже Лоренц показал, что гипотеза абсолютно твердого и неизменяемого электрона несовместима с отрицательным результатом опытов, проведенных для того, чтобы показать общее движение системы (подобной, например, Земле) по отношению к среде, передающей электромагнитные действия *. Принцип относительности, резюмирующий и выражающий совокупность этих результатов, требует, как показал Лоренц, чтобы электрон деформировался при изменении скорости, все более сплющиваясь при этом по направлению движения по мере увеличения скорости; причем размеры, перпендикулярные к скорости, не изменяются. В этих условиях продоль-

* См. *Г. А. Лоренц,* Теория электронов, М., 1934, гл. V. — *Прим. ред.*

ные и поперечные массы представлены в функции скорости гораздо более простыми выражениями, чем в случае твердого электрона. Если m_0 выражает первоначальную массу, появляющуюся при малых скоростях, то поперечная масса m_t для скорости v может быть выражена так:

$$m_t = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}}.$$

Кроме того, что закон изменения массы совместим с отрицательным результатом опытов, предпринятых для обнаружения абсолютного движения Земли, усовершенствования измерений отношения заряда к массе для β-частиц радия дали возможность получить прямую проверку приведенной формулы.

Введение изменяемого электрона требует введения других форм энергии, кроме тех, которые имеются в электрическом и магнитном полях. Действительно, как показал Пуанкаре, для каждой величины скорости сплющенная форма (которую требует принцип относительности) является результатом равновесия между электромагнитными действиями, стремящимися рассеять заряд электрона, и постоянным, независимым от скорости давлением, которое производится извне на поверхность электрона и стремится его сжать. В данном случае форма равновесия изменяется соответственно скорости так, как требует теория, но при условии, что это вызовет появление действий, подобных давлению, которые способны уравновесить электромагнитные и другие действия.

Эти действия Макс Абрагам заменил в своем неизменяемом электроне связями, обеспечивающими сохранение формы при любых скоростях, причем связям этим не соответствует ни одна из новых форм энергии, поскольку не происходит никакой деформации.

Теория относительности показывает, что гипотеза абсолютно твердого, неизменяемого электрона несовместима с законами электромагнетизма, к которым ее присоединили; она соответствует прежней кинематике с ее понятиями пространства и времени, требуемыми классической механикой, а между тем электромагнетизм, чтобы оставаться в согласии с принципом относительности, требует новой кинематики, из которой устранено даже самое понятие о неизменном твердом теле. Таким образом, электрон Макса Абрагама не мог быть примирен одновременно и с принципом относительности и с электромагнетизмом.

Хотя нам и пришлось отказаться от первоначальной цели электромагнитной динамики, и мы вынуждены были допустить другие формы сил, кроме тех, с которыми действуют на заряды

электрическое и магнитное поля, открытие принципа относительности показало, тем не менее, что все эти силы, независимо от их природы, должны преобразовываться при переходе от одной координатной системы к другой таким же образом, как и электромагнитные силы. Иначе говоря, уравнения, посредством которых выражены все законы физики, должны допускать ту же группу преобразований, какую допускают уравнения электромагнетизма. В частности, инерция — как электромагнитного, так и неэлектромагнитного происхождения — должна вести себя всегда одинаково и изменяться в зависимости от скорости, как это предвидел Лоренц и как подтвердили опыты с β-лучами радия.

Новая динамика может быть развита последовательно, лишь становясь на точку зрения принципа относительности.

Заключение. Исходя из установленного опытным путем зернистого строения электрических зарядов и применяя к зернам электричества прежде всего обычные законы механики, мы получили объяснения большого количества фактов из электромагнетизма и оптики. Затем мы увидели, что необходимо создать новую динамику, в которой электромагнитные законы играют основную роль.

Попутно мы встретились с трудностями в связи с тем, что электрон при движении внутри атома не подчиняется тем же законам, каким он подчиняется в своем свободном движении.

Нам еще неизвестны структура и законы атомного здания, но мы знаем, однако, что электроны там имеются и что они играют большую роль. Несмотря на затруднения в области законов излучения и еще не получившую объяснения сложность всех аспектов явления Зеемана, мы не должны все же забывать величия уже осуществленного синтеза.

ИНЕРЦИЯ ЭНЕРГИИ И ЕЕ СЛЕДСТВИЯ *

Понятие массы, являющееся в механике основным, может быть введено тремя различными способами, соответствующими трем аспектам явления инерции.

Массу можно определить, как: 1) коэфициент пропорциональности силы ускорению; 2) емкость импульса или количества движения; 3) емкость живой силы или кинетической энергии.

Рациональная механика требует совпадения этих различных определений и, кроме того, допускает абсолютную неизменность массы для одной и той же части материи вне зависимости от всех изменений, которым она может подвергаться: физических, химических или механических (все это при условии более или менее быстрого движения).

1. Масса — коэфициент инерции. Обычно под инерцией подразумевают свойство материи сохранять приобретенное ею движение; материя сопротивляется изменениям своей скорости, и, таким образом, чтобы изменить величину или направление этой скорости, необходимо внешнее воздействие или внешняя сила.

Ньютон принял, что существует пропорциональность между силой, действующей на тело, и изменением скорости, которое она ему сообщает в единицу времени, или ускорением; постоянное частное от деления этих двух величин послужило ему для определения массы тела **.

---

* Доклад, сделанный во Французском физическом обществе 26 марта 1913 г. — *Прим. ред.*

** Это не совсем точно. Частное от деления силы на ускорение служило Ньютону для определения *величины* массы, *числа,* характеризующего массу, но не самого понятия массы. Содержание, которое Ньютон вкладывал в понятие «масса», было: количество материи.

В Определении I «Начал» прямо утверждается: «Количество материи есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее» (перевод со 2-го издания акад. Крылова). Ниже это «количество материи» называется массой.

При этом Ньютон был убежден в существовании простой числовой характеристики количества материи в единице объема (плотности), которая должна играть фундаментальную роль во всем учении о движении тел. Он считал возможным установить такую характеристику просто пропорциональной числу атомов в единице объема, поскольку считал, что атомы любых тел должны быть тождественными между собой. На основе понятия массы

Из основного закона Ньютона (независимость действия сил и ранее приобретенного движения) вытекает, что ускорение всегда имеет направление силы, которая обуславливает ускорение, каково бы ни было направление силы по отношению к уже приобретенной скорости, — будет ли сила продольной (ускорение по касательной), поперечной (ускорение по нормали) или косой к траектории.

2. Масса — емкость импульса. Каждой части материи, каждой материальной точке, находящейся в движении, соответствует направленная величина, ее импульс G, равный нулю в состоянии покоя; согласно определению, *изменение импульса в единицу времени дается по величине и направлению результирующей силой, действующей на эту часть материи.* Другими словами, если импульс, сообщенный силой f в течение времени dt, определяется по величине и направлению произведением fdt, то импульс всего тела является, по определению, геометрической суммой элементарных импульсов, сообщенных телу (начиная от состояния покоя) различными силами, воздействовавшими на него.

Для системы тел, которые вообще могут влиять друг на друга, общий импульс определяется как геометрическая сумма индивидуальных импульсов. Из принципа равенства действия и противодействия вытекает, что если система замкнута, т. е. изолирована от всякого внешнего воздействия, этот общий импульс остается неизменным, хотя индивидуальные импульсы частей системы могут меняться пропорционально силам, с которыми части системы действуют друг на друга.

Из закона инерции вытекает, что импульс G, который испытывает тело, выведенное из состояния покоя, равен его количеству движения, т. е. произведению массы на скорость, и направлен параллельно скорости, откуда вытекает векториальное отношение:

$$G = mv.$$

При помощи этого отношения массу можно было бы определить также как *емкость импульса,* как частное от деления

Ньютон строит понятие *количества движения:* «Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе» (Определение II). И только затем, после провозглашения *принципа инерции,* он вводит понятие силы, как действия, вызывающего *изменение количества движения:* «Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения» (Определение IV).

Во второй «аксиоме движения» Ньютон прямо устанавливает величину силы через изменение количества движения в единицу времени.

Ясно поэтому, что Ньютон и не мог думать определять понятие массы, как «частное от деления силы, действующей на тело, и ускорения, которое она ему сообщает», т. е. как коэфициент. — *Прим. ред.*

импульса на скорость («масса Мопертюи», введенная А. Пуанкаре). Можно еще назвать ее емкостью количества движения, если рассматривать последнее выражение как синоним импульса.

Я настаиваю на том, что принцип сохранения импульса или общего количества движения, присущего материи в замкнутой системе, является следствием принципа: «действие равно противодействию» *, и что он не будет иметь места при отсутствии последнего.

3. Масса — емкость кинетической энергии. Подобно тому, как понятие импульса, сообщенного какой-то силой, приводит к провозглашению принципа сохранения количества движения, понятие работы приводит к формулировке, во все более и более общей форме, принципа сохранения энергии.

По определению, *кинетическая энергия материальной точки, находящейся в движении, равна алгебраической сумме работ сил, воздействовавших на точку, начиная от состояния покоя.* В отношении тела, имеющего конечные размеры, это определение остается без изменений только при том условии, если сообщение ему движения не сопровождалось какой-либо деформацией, если тело осталось без изменений для наблюдателей, которые с ним связаны. Однако можно заметить, что включать ограничение этого рода в данное нам определение понятия импульса нет необходимости. Ниже мы увидим, что отношение массы к энергии будет столь же простым и тогда, когда вместо кинетической энергии мы введем понятие о полной энергии движущегося тела.

Сейчас же мы ограничимся тем, что определим кинетическую энергию w тела как всю работу, которую нужно выполнить, чтобы получить фактическое движение этого тела, предполагая его *конфигурацию неизменной.*

При этих условиях, согласно рациональной механике, мы имеем (если m — масса тела и v — его скорость):

$$w = \frac{1}{2} mv^2.$$

Это отношение можно было бы использовать также и для того, чтобы определить массу как *емкость кинетической энергии,* как частное от деления двойной кинетической энергии или живой силы на квадрат скорости (кинетическая масса А. Пуанкаре).

4. Инерция, как основное свойство, и механицизм. Со времен Ньютона допускают (и именно таким образом начинаются все

---

* Вместо: принцип сохранения количества движения является следствием принципа «действие равно противодействию», лучше сказать: принцип «действие равно противодействию» *выражает* закон сохранения количества движения. — *Прим. ред.*

физические трактаты), что инерция есть основное свойство материи, существование которой невозможно свести к более простым явлениям и должно, наоборот, быть принято как основа для объяснения. В течение более чем двух веков считали даже (и это самое существенное в механистической доктрине), что физическое явление не может быть полностью объяснено, пока оно не сведено к движениям, управляемым законами рациональной механики, и в частности законом инерции.

Несмотря на совершенство формы и большие услуги, которые в течение веков оказывал нам механицизм, теперь мы не можем сохранять здание ньютоновской динамики, в котором инерция, измеренная неизменной массой, является одним из главных устоев.

В настоящее время инерция уже не является основным свойством материи, так как теперь имеется возможность объяснить инерцию (по крайней мере, частично), исходя из законов электромагнетизма, повидимому, более первоначальных и более простых. Теперь мы хорошо знаем, что массу нельзя считать неизменяемой, потому что ее различные определения перестают совпадать, когда скорость материи перестает быть незначительной по отношению к скорости света и когда все три определения для одной и той же части материи приводят к значениям, зависящим от скорости, но сообразно трем различным законам.

Больше того, в состоянии близком к покою, т. е. для малых скоростей, хотя указанные три определения совпадают и приводят для данной части материи к определенной *начальной массе* m_0, *начальная масса все же зависит от физического или химического состояния системы и меняется при всяком изменении, сопровождающемся обменом энергии с внешним миром,* например посредством излучения.

Данные современной физики показывают, что всякое увеличение ΔE общей энергии тела, находящегося в движении или покое, выражается пропорциональным увеличением Δm его массы, согласно чрезвычайно простому уравнению:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{V^2}.$$

Масса тела, даже для малых скоростей, остается постоянной только в той мере, в какой остается неизменной внутренняя энергия.

В изолированной системе, в которой различные части обмениваются энергией друг с другом, индивидуальные массы не сохраняются; неизменной остается только общая масса — и то лишь при условии, что эта система не получает и не теряет энергии.

Сохранение массы перестает быть отдельным принципом; этот принцип соединяется с принципом сохранения энергии. От этого объединения двух принципов, рассматривавшихся ранее как независимые, наше здание науки выигрывает как в простоте, так и в гармонии. С наибольшим трудом достигнутый при помощи последовательных обобщений принцип сохранения энергии представляется нам значительно более фундаментальным, чем принцип сохранения массы, который сводится всего-навсего к одному из аспектов принципа энергии.

Само собой разумеется, впрочем, что отклонения от результатов, даваемых рациональной механикой, становятся чувствительными только в исключительных обстоятельствах.

Механика сохраняет свое высокое практическое значение при всех обстоятельствах, при которых речь идет о скоростях, не превышающих 30 000 *км/сек*, или об изменениях состояния, не требующих громадной энергии, подобно той, которой обладают радиоактивные тела, или той, которая должна была сопровождать образование атомов. Сделав эти оговорки, массу можно рассматривать как неизменную величину и уравнения динамики — как точные. Рациональная механика лишь теряет свою универсальную объяснительную способность, которая составляла ее исключительную привилегию, и остается в качестве первого приближения, почти всегда достаточного.

5. Электромагнитная инерция. Недостаточность механицизма ясно проявилась во время безуспешных попыток вывести из него объяснения оптических и электромагнитных явлений. Глубокую причину этих затруднений мы видим теперь в том, что уравнения динамики, с одной стороны, уравнения электромагнетизма — с другой, пользуются не одними и теми же, а разными концепциями пространства и времени; нам кажется, и не без основания, что концепция электромагнетизма более правильна, чем концепция, относящаяся к рациональной механике; последняя представлет собой не больше, как первое приближение. Поэтому примерно вот уже десять лет ученые считают, что более плодотворной была бы попытка отыскать электромагнитную интерпретацию инерции, чем механическое объяснение законов электромагнетизма. Последние очень просты, и это делает их вполне пригодными для того, чтобы служить для физики базой и принципом объяснения.

Хотя мы еще далеки от возможности утверждать, что подобный электромагнитный синтез возможен, однако усилия, сделанные для того, чтобы создать такой синтез, и изменение точки зрения, которое влечет за собой этот синтез, уже показали себя чрезвычайно богатыми новыми следствиями и новыми горизонтами; о некоторых из них я скажу ниже.

Первое указание на возможность объяснения инерции было дано в 1881 г. Дж. Дж. Томсоном примерно на двадцатом году его жизни.

Будучи увлечен идеями Максвелла, культивировавшимися в Кембридже, Дж. Дж. Томсон понял, что уже сама наэлектризованность того или иного тела сообщает последнему своеобразную инерцию электромагнитного происхождения. Это вытекает из закона о токе конвекции, из свойства находящегося в движении наэлектризованного тела создавать вокруг себя магнитное поле. Это свойство, выведенное Максвеллом из уравнений, которые он установил и которые послужили основанием для вычислений Томсона, в настоящее время можно считать экспериментально доказанным фактом.

Опыты Роуланда и его учеников подтвердили этот теоретический вывод количественно и качественно: наэлектризованное тело, например сфера с радиусом a и с зарядом e, двигаясь равномерно со скоростью v, создает вокруг себя магнитное поле, распространяющееся круговыми силовыми линиями, плоскость которых нормальна к направлению скорости, и с центрами на траектории центра движущейся сферы *.

Другими словами, магнитное поле в точке A нормально расположено к плоскости Aov, которая проходит через точку A и траекторию центра и имеет своей величиной, по крайней мере, *когда скорость v достаточно мала по отношению к скорости света V:*

$$H = \frac{ev \sin \alpha}{r^2}. \quad (1)$$

Если сфера заряжена только на поверхности, она не создает внутри себя никакого магнитного поля, так же как не создает она и электрического поля, и формула (1) действительна только

* Гораздо большее значение и бо́льшую точность имели блестящие работы (1901—1903 гг.) русского физика А. А. Эйхенвальда. В опытах Эйхенвальда приводился во вращение эбонитовый диск, покрытый сверху и снизу металлич скими кольцами. Кольца заряжались: один — положительным, другой — отрицательным электричеством. При этом можно было вращать диск и кольца по отдельности или вместе. Создаваемое при вращении магнитное поле, аналогичное полю кольцевого тока, измерялось при помощи помещаемой в центре магнитной стрелки. Для сравнения применялся обычный ток от батарей, пропускавшийся по металлическим кольцам и производивший совершенно такое же действие (при соответствующей силе тока) на магнитную стрелку.

Опытами Эйхенвальда было подтверждено существование токов конвекции, вызванных движением как обычных электрических зарядов (вращение заряженных колец), так и зарядов, скапливающихся на поверхностях диэлектрика, например эбонитового диска, помещенного в электрическое поле (так называемый ток Рентгена); было доказано также количественное совпадение соответствующей силы тока с предсказанной теоретически. — *Прим. ред.*

при $r \wedge a$. С другой стороны, распространение на электромагнитные явления принципа сохранения энергии требует, как известно, чтобы образование электрического поля h в среде с диэлектрической постоянной K вызывало затрату энергии, распределенной в этой среде в отношении $\frac{Kh^2}{8\pi}$ на единицу объема, и чтобы образованию магнитного поля H в среде с магнитной проницаемостью μ соответствовала энергия с плотностью $\frac{\mu H^2}{8\pi}$.

Чтобы найти электрическую энергию W_e и магнитную W_m, распределенные в части среды, занимающей ограниченное пространство, необходимо вычислить в этом пространстве интегралы:

$$W_e = \int \frac{Kh^2}{8\pi} d\tau \quad \text{и} \quad W_m = \int \frac{\mu H^2}{8\pi} d\tau,$$

причем $d\tau$ представляет собой элемент объема.

Отсюда легко сделать вывод, что в соответствии с хорошо известным электростатическим результатом электрическое поле, окружающее нашу сферу с поверхностным зарядом e и радиусом a (по предположению, находящуюся в пустоте, с диэлектрической постоянной K_0 и магнитной проницаемостью μ_0), обладает в состоянии покоя потенциальной электростатической энергией:

$$W_0 = \frac{e^2}{2K_0 a}. \tag{2}$$

Поскольку сфера движется с малой — по отношению к скорости света — скоростью, это электрическое поле остается распределенным так же, как и в состоянии покоя, и сопровождает сферу в ее движении: сфера как бы увлекает за собой след, или «пышную шевелюру», состоящую из радиальных силовых линий, симметрично расположенных вокруг нее; электростатическая энергия, остающаяся постоянной в течение всего времени, пока скорость остается небольшой, перемещается, таким образом, вместе с зарядом.

Однако перемещение электрического поля влечет за собой, согласно опытам Роуланда, появление магнитного поля, окружающего наэлектризованное тело и сопровождающего его также в движении. Это поле, пропорциональное скорости в силу закона о токе конвекции*, заключает в себе энергию, пропорциональную квадрату скорости, которую легко вычислить, исходя из выражения плотности энергии на единицу объема $\frac{\mu_0 H^2}{8\pi}$;

* Точнее говоря, последнее утверждение вводит принцип относительности, роль которого в этой теории, таким образом, начинает проявляться.

причем энергия оказывается равной:

$$W_m = \frac{\mu_0 e^2}{3a} v^2. \tag{3}$$

Эта энергия должна быть доставлена тогда, когда заряженная сфера начинает двигаться под воздействием внешних сил, сообщающих ей скорость v. Она остается связанной со сферой в продолжение всего ее пути и должна быть отдана обратно в момент остановки в виде работы, направленной против тормозящих движение сил.

Впрочем, для связанных с телом наблюдателей эти обмены работы оставляют, несмотря на приведение в движение или остановку, наэлектризованное тело тождественным самому себе, потому что для наблюдателей это тело остается окруженным исключительно своим электростатическим полем (1).

Энергия W_m обладает, следовательно, всеми характерными чертами кинетической энергии, включая сюда также и свойство быть пропорциональной квадрату скорости, и соответствует существованию кинетической массы с дополнительной инерцией электромагнитного происхождения:

$$m_0 = \frac{2\mu_0 e^2}{3a}. \tag{4}$$

Эта инерция вытекает единственно из того, что сфера наэлектризована и прибавляется к инерции, которую сфера может иметь независимо от заряда.

Отсюда, сравнивая (4) с (2), можно отметить, что электромагнитная инерция, которую следует приписать наличию электрического поля вокруг сферы, пропорциональна энергии W_0, которую содержит это электрическое поле и которую сфера уносит с собой.

Всякое изменение заряда или радиуса, а следовательно, и энергии, присущей сфере в состоянии покоя, влечет за собой пропорциональное изменение ее инерции.

Ниже мы более подробно рассмотрим отношение, существующее между инерцией системы и потенциальной энергией, которую она может заключать в себе.

Мы увидим также, что при скоростях того же порядка, что и скорость света, электрическое поле распределяется вокруг сферы, находящейся в движении, уже не так, как в состоянии покоя; оно представляет собой энергию W_e, отличную от W_0. Если энергию магнитного поля обозначить через W_m, то работа, необходимая для того, чтобы заряженное тело — именно как заряженное — привести в движение, будет:

$$w = W_e + W_m - W_0.$$

Эта работа соответствует кинетической энергии тела, так как наэлектризованное тело имеет для связанных с ним наблюдателей всегда один и тот же вид.

Предыдущее, чрезвычайно простое рассуждение привело нас к предположению, что при состоянии, не слишком отличающемся от состояния покоя, существует начальная дополнительная масса m_0, если мы станем на точку зрения нашего третьего определения, т. е. определения кинетической массы; как мы показали, тело, уже только потому, что оно наэлектризовано, обладает дополнительной емкостью для энергии движения.

Чтобы показать это, необходимо вспомнить, как сделал А. Пуанкаре, о принципе сохранения количества движения в электромагнитном поле, точно так же, как, исходя из принципа сохранения энергии, мы должны были допустить хорошо известное понятие локализации энергии, которым мы только что воспользовались. Попутно мы остановимся на общих результатах, которые в дальнейшем нам будут полезны.

6. Эфир и электромагнитные волны. Прежде всего, следует вернуться назад и коротко восстановить в памяти основные электромагнитные свойства пустоты, сформулированные Максвеллом и экспериментально подтвержденные Герцем.

Оба поля, электрическое и магнитное (h и H), проявляющиеся в эфире и соответствующие локализациям указанных выше энергий, зависят одно от другого и настолько взаимосвязаны, что каждое из них может существовать в отдельности только при условии, если оно не будет изменяться: всякое изменение во времени одного из двух полей влечет появление другого. Изменение магнитного поля в данной области эфира создает электрическое поле, замкнутые силовые линии которого охватывают направление, по которому меняется магнитное поле; это — явление электромагнитной индукции.

Если пространство, где таким путем создалось это электрическое поле, оказывается занятым проводником, то в нем возникают индуцированные токи, охватывающие направление, по которому меняется магнитное поле. Количественное отношение этой связи хорошо выражено известным законом индукции: *электродвижущая сила или работа электрического поля вдоль какого-либо замкнутого контура C равна изменению в единицу времени потока магнитной индукции через любую поверхность S, охватываемую контуром C.*

Магнитная индукция B равна в пустоте $\mu^0 H$; и если Φ — ее поток через поверхность S, мы получим:

$$\int_c h \cos \alpha \, dl = \frac{d\Phi}{dt}. \tag{5}$$

Соответственно, изменение электрического поля в данной области эфира создает магнитное поле, замкнутые силовые линии которого охватывают направление, по которому изменяется электрическое поле. Это первичное, предвиденное Максвеллом, явление *тока смещения*, из которого, как мы ниже увидим, можно непосредственно вывести закон *тока конвекции*, экспериментально подтвержденный Роуландом, так же как распространение электромагнитных волн со скоростью света, было экспериментально подтверждено Герцем.

Количественное отношение, выражающее закон тока смещения, симметрично предыдущему: *магнитодвижущая сила, или работа магнитного поля, вдоль какого-либо замкнутого контура C равна изменению в единицу времени потока электрической индукции через какую-либо поверхность S, расположенную в пустоте и опирающуюся на контур C.*

Электрическая индукция b равна в пустоте $K_0 h$ и, если φ — ее поток через поверхность S, мы получим:

$$\int_C H \cos \beta \, dl = \frac{d\varphi}{dt}. \tag{6}$$

Отношения (5) и (6) влекут за собой в качестве непосредственного следствия тот факт, что электромагнитное возмущение, произведенное, например, искровым разрядником Герца, распространяется в пустоте сферически, со скоростью $\frac{1}{\sqrt{K_0\mu_0}}$. Это количество может быть выведено из сравнения двух систем единиц — электростатической и электромагнитной CGS, и опыт показывает, что численно оно равно скорости света *.

Прочие характерные свойства этого возмущения оказываются особенно простыми, когда оно рассматривается на достаточно большом расстоянии от источника, чтобы иметь право уподобить его плоской волне, распространяющейся нормально к своей плоскости. Те же самые уравнения показывают, что возмущение, представляемое этой волной, состоит из электрического поля h, расположенного в плоскости волны и перпендикулярного, следовательно, к направлению распространения, и магнитного поля H, равным образом поперечного и расположенного в плоскости волны нормально к направлению электрического поля.

Три направления — электрического поля, магнитного поля, распространения волны — образуют, таким образом, триэдр с тремя прямыми углами, направление сторон которых можно получить, сопоставляя три первых пальца правой руки в указанном

* См. примечание на стр. 165 — *Прим. ред.*

порядке. Более того, величины обоих полей таковы, что они представляют равные энергии на единицу объема в любой свободно распространяющейся плоской волне, откуда соотношение:

$$K_0 h^2 = \mu_0 H^2 \quad \text{или} \quad H = \sqrt{\frac{K_0 h}{\mu_0}}. \tag{7}$$

Таким образом, электромагнитные волны, которые предвидел Максвелл, своими характерными свойствами — величиной скорости распространения, взаимной перпендикулярностью векторов, представляющих состояние среды, — дают прекрасное изображение световых волн. Аналогия сделалась еще более поразительной после того, как Герцу удалось создать световые волны чисто электрическим путем и изучить их свойства. В настоящее время мы должны считать установленным фактом электромагнитную природу света и допустить для ее волн ту структуру, которую я вам только что изложил. Это — первая и притом исключительно интересная проверка и подтверждение закона тока смещения Максвелла.

7. Ток конвекции. Этот же закон приводит к предвидению появления магнитного поля вследствие движения наэлектризованного тела. Действительно, в силу того, что наэлектризованное тело уносит с собой электрическое поле, произведенное его зарядом, интенсивность этого поля изменяется в некоторой точке среды, в то время, когда наэлектризованное тело приближается, проходит и затем удаляется. Таким образом, происходит изменение во времени электрического поля среды и, следовательно, появление магнитного поля в силу закона тока смещения. Применяя выражение этого закона, даваемое формулой (6), к случаю сферы и предполагая, что скорость достаточно мала и электрическое поле остается распределенным вокруг этой сферы так же, как и в состоянии покоя, мы легко приходим к выражению (1), подтверждаемому на опыте.

Нетрудно понять, что это выражение магнитного поля, образованного конвекцией, перестает быть точным, когда скорость v становится достаточно большой: наэлектризованное тело увлекает с собой как электрическое поле, так и магнитное, изменяя в точках среды интенсивность магнитного поля, и, следовательно, вызывая появление, в силу закона индукции, выраженного (5), электрического индуктированного поля, которое прибавляется к электростатическому полю и изменяет его распределение. Подсчет показывает, что это изменение становится чувствительным только тогда, когда скорость v перестает быть малой по отношению к скорости света:

$$V = \frac{1}{\sqrt{K_0 \mu_0}}. \tag{8}$$

По мере увеличения скорости v силовые линии электрического поля, остающиеся радиальными на достаточно больших — по сравнению с радиусом этой сферы — расстояниях, перестают быть равномерно распределенными вокруг сферы и, как показал Дж. Дж. Томсон, имеют тенденцию собираться вблизи экваториальной плоскости, перпендикулярной к направлению скорости. Эти силовые линии, связанные с наэлектризованным движущимся телом, при больших скоростях стремятся располагаться поперечно по отношению к направлению движения, и они достигли бы этого положения, если бы скорость сферы v могла достигнуть скорости света и если энергия электромагнитного поля, соответствующая этой предельной конфигурации, не становилась бы при этом бесконечной. Скорость света, таким образом, представляет собой высший предел — предел, которого не может достичь наэлектризованное тело и для которого кинетическая энергия, определенная как

$$w = W_e + W_m - W_0,$$

становится бесконечной. Следовательно, кинетическая энергия увеличивается быстрее, чем показывает формула (3), и перестает быть пропорциональной квадрату скорости, когда эта скорость приближается к скорости света; на точной форме ее выражения мы остановимся ниже.

8. Сила Лоренца. Подобно тому, как движущееся наэлектризованное тело создает магнитное поле и может действовать на магнит, вблизи которого оно проходит (опыт Роуланда), магнит в свою очередь, также производит на заряженное тело некоторое действие, сила которого определяется интенсивностью магнитного поля, создаваемого магнитом в той точке, где находится это тело, а также зарядом и скоростью этого тела. Другими словами, наэлектризованное тело, имеющее заряд e и движущееся со скоростью v во внешнем магнитном поле H, образующем с направлением скорости угол β, подвергается действию силы

$$f = \mu_0 Hev \sin\beta, \tag{9}$$

направленной перпендикулярно к плоскости, заключающей H и v в направлении, указываемом средним пальцем левой руки, большой палец которой расположен в направлении H, а указательный — в направлении v; причем заряд e предполагается положительным.

Действие этой силы производит отклонение катодных частиц, α- и β лучей радиоактивных тел во внешнем магнитном поле.

Если в точке, где находится движущееся наэлектризованное тело, одновременно с магнитным полем существует также и электрическое внешнее поле h, то указанная выше сила складывается с электрической силой $h \cdot e$, направленной вдоль поля h.

Последняя, естественно, может существовать и одна, если магнитное поле равно нулю или если наэлектризованное тело неподвижно.

9. Действие и противодействие. Таким образом, силы, которые действуют на движущиеся заряженные тела и существование которых подтверждается опытом количественно и качественно, не удовлетворяют принципу равенства действия и противодействия *.

Можно доказать, что так обстоит дело даже в случае взаимных действий двух наэлектризованных тел, движущихся со скоростями, достаточно малыми, чтобы формула (1) оставалась бы применимой к ним обоим. Взаимная электрическая сила, определяемая законом Кулона, удовлетворяет равенству действия и противодействия, но не так обстоит дело в отношении электромагнитных сил Лоренца, которые возникают при движении каждого из двух тел в магнитном поле, создаваемом другим телом. Следовательно, то же можно сказать и в отношении больших скоростей, при которых ни электрическая, ни электромагнитная силы, ни их равнодействующая не подчиняются данному принципу.

Этот факт становится особенно ясным, когда присоединяется излучение, в чем легко можно убедиться, если изучать явление лучистого давления, существование которого можно предвидеть на основании изложенных выше результатов. Вообразим источник электромагнитного излучения, распространяющий вокруг себя лучи симметрично по отношению к какой-нибудь оси, — разрядник Герца или раскаленное тело, излучающее свет. В момент испускания излучение (в силу симметрии) не оказывает на источник никакого давления. Предположим, что на некотором расстоянии и в определенном направлении испущенное возмущение, могущее быть принятым за плоскую волну, встречает препятствие, например металлическую пластинку или приемную антенну. Электрическое поле, заключенное в волне, действует на это препятствие и производит в нем ток по своему направлению, а магнитное поле, заключенное в той же волне, действует на этот ток с силой, имеющей направление распространения излучения. Таким образом, можно было теоретически предвидеть существование давления излучения, установленного ныне экспериментально **. Сила светового давления отталкивает препятствие в направлении распространения излучения, и, следовательно, действие не компенсируется никаким противодействием, оказываемым на часть какой-либо материи.

* Дело здесь заключается в том, что количество движения наэлектризованных тел нельзя уже рассматривать, не учитывая количества движения электромагнитного поля, окружающего эти тела. Закон сохранения количества движения остается справедливым для полной системы — заряженных тел и поля. — *Прим. ред.*

** Это установлено опытами знаменитого русского физика П. Н. Лебедева. — *Прим. ред.*

Таким образом, если принимать во внимание только материю, то здесь налицо появление некоторого количества движения у препятствия в тот момент, когда до него доходит излучение: имеется действие без противодействия и нет сохранения количества движения, которым обладает материя *.

Кроме того, эти явления можно рассматривать и под другим углом зрения, если предположить, что препятствие получает и поглощает все излучение, испущенное источником; при этом источник считается не симметричным и предполагается, что свет он испускает лишь в направлении препятствия, расположенного на некотором от него расстоянии. Препятствие отталкивается получаемым им от источника излучением сразу же, как только излучение достигает препятствия. Следовательно, здесь мы имеем обратное тому, что было в предыдущем случае: противодействие существует, но оно опередило действие на отрезок времени, равный тому, который необходим для прохождения светом расстояния между источником и препятствием. Теория действительно показывает, что источник света в момент излучения подвергается действию отдачи, эквивалентному, по количеству движения, импульсу, которому подвергается препятствие. Однако в каждый данный момент нет равенства действия и противодействия: какое-то количество движения исчезает из материи (источника) в момент испускания и появляется несколько позже у препятствия — в момент поглощения.

10. Электромагнитное количество движения. Этот прием описания фактов можно было бы принять и отбросить (по крайней мере, в отношении электромагнетизма) принцип сохранения количества движения. Однако, как показал А. Пуанкаре, можно сохранить такие принципы, простота которых при надлежащем обобщении выражаемых ими понятий делает их употребление столь удобным. Чтобы убедиться в этом, достаточно допустить, что излучение или электромагнитное возмущение в пустоте представляют собой некоторое количество движения, распространяющееся вместе с излучением и исчезающее, когда оно поглощается**. В первом случае импульс, которому подвергается препятствие, компенсируется первоначально отсутствующей по причине симметрии пертурбацией, вызываемой препятствием в излучении, именно в количестве движения, которое представляет собой это излучение.

* Электромагнитное поле, как и обычное вещество (которое только Ланжевен и называет материей), — одна из форм материи. Рассматривая вопрос о сохранении количества движения, нельзя исключать электромагнитное поле, всегда обладающее определенным количеством движения. В целом для всей материи закон сохранения количества движения выполняется строго. Об этом Ланжевен говорит ниже. — *Прим. ред.*

** Дело, конечно, не в «удобстве» и «простоте», о которых говорит идеалист Пуанкаре, а в объективных свойствах материи. — *Прим. ред.*

Во втором случае, в момент испускания, отдача, испытываемая источником света, компенсируется количеством электромагнитного движения появившегося излучения, а это количество движения в свою очередь превращается в импульс, которому подвергается препятствие в момент поглощения.

Следовательно, мы снова можем притти к принципу сохранения, если излучение будем рассматривать в качестве носителя количества движения. Точно так же рассуждают, когда излучение рассматривают как переносчика энергии. Действительно, локализацию энергии в электрическом и магнитном полях, за пределами материи, мы допускаем для того, чтобы удержать значимость принципа сохранения энергии, так же как мы пытаемся поступать здесь в отношении количества движения. Материя теряет энергию в тот момент, когда источник ее испускает, и наоборот, она получает энергию, когда препятствие ее поглощает; и в каждый данный момент сохранение энергии может иметь место только в том случае, если мы допускаем, что электромагнитное поле является формой энергии в количестве, равном $\frac{K_0h^2}{8\pi}+\frac{\mu_0H^2}{8\pi}$ на единицу занимаемого объема. Мы, вместе с Пуанкаре, приходим поэтому к выводу, что электромагнитное поле следует рассматривать также и в качестве формы количества движения. Выражение, касающееся локализации количества движения, настолько же просто, как и выражение, касающееся локализации энергии.

В некоторой области эфира — местопребывании электрического поля h и магнитного поля H, направления которых находятся между собой под углом α, — на единицу объема необходимо допустить количество движения:

$$g=\frac{K_0\mu_0Hh\sin\alpha}{4\pi}=\frac{S}{4\pi V^2}, \tag{10}$$

где S представляет собой площадь параллелограмма, построенного на h и H. Это количество движения направлено нормально к плоскости параллелограмма — в направлении, которое указывает средний палец правой руки, большой и указательный которой соответственно направлены на h и H. Выведенный таким образом закон является общим законом.

Прежде чем воспользоваться им для расчетов электромагнитной массы (в смысле Мопертюи) нашей наэлектризованной сферы, чрезвычайно интересно применить его к случаю плоской волны.

Принимая то описание, которое мы дали подобной волне, легко можно видеть, что, согласно изложенному, эта волна должна представлять собой количество движения, имеющее направление распространения волны, т. е. перпендикулярное плоскости волны,

заключающей в себе оба поля — электрическое и магнитное; с другой стороны, поскольку эти поля перпендикулярны одно к другому, угол ϕ будет прямым. Далее, если учитывать соотношение (7), которое существует между их величинами, и соотношение (8), то для плотности g количества движения получается:

$$g = \frac{K_0 h^2}{4\pi V}. \tag{11}$$

Плотность энергии на основании (7) будет:

$$E = \frac{K_0 h^2}{8\pi} + \frac{\mu_0 H^2}{8\pi} = \frac{K_0 h^2}{4\pi}, \tag{12}$$

откуда получается чрезвычайно простое соотношение для случая плоской волны:

$$g = \frac{E}{V}. \tag{13}$$

Давление излучения вычисляется непосредственно из этой формулы: оно возникает в результате передачи препятствию количества движения, содержащегося в поглощенном излучении. Если поглощение полное и падение луча нормально, то давление излучения или количество движения, передаваемое на единицу поверхности в единицу времени, численно равно количеству движения, которое содержит излучение в объеме, равном по величине скорости распространения V волны, следовательно, равно gV или E, согласно соотношению (13). Отсюда следует, что *давление излучения при нормальном падении численно равно энергии излучения в единице объема.*

Случаи косого падения или неполного поглощения (с отражением или без отражения) могут быть вычислены без особых затруднений.

11. Электромагнитная масса. Поскольку мы знаем распределение электрического и магнитного полей вокруг наэлектризованного тела, находящегося в движении со скоростью v, то, применяя формулу (10), легко найти количество всего электромагнитного движения, локализованного в сопровождающем это тело электромагнитном следе: по принципу сохранения количества движения, оно было порождено силами, которые привели тело в движение, и будет возвращено обратно в момент остановки. Электризация тела сообщает ему, таким образом, дополнительную емкость количества движения — массу в смысле Мопертюи — электромагнитного происхождения.

Для случая сферы, скорость которой мала, электрическое поле, равное нулю внутри сферы, если заряд расположен по поверхности, имеет на расстоянии r величину:

$$\frac{e}{K_0 r^2} \text{ при } r > a.$$

Поскольку это поле радиально и поскольку магнитное поле, данное формулой (1), нормально к меридиальной плоскости, проходящей через траекторию центра и через точку, где измеряются поля, то плотность g количества движения в этой точке должна быть расположена в меридиальной плоскости и нормально к радиусу, причем в таком направлении, что его проекция на скорость в любой точке поля имеет направление данной скорости. Величина этой плотности будет:

$$g = \frac{\mu_0 e^2 v \sin\alpha}{4\pi r^4}.$$

Нетрудно видеть, что полное количество движения, локализованное в следе, имеет направление скорости в силу симметрии; его вычисляют, интегрируя во всем внешнем, по отношению к сфере, объеме произведение каждого элемента объема на $g\sin\alpha$ — величину проекции соответствующей плотности на направление скорости, и в итоге получают:

$$G = \frac{2\mu_0 e^2}{3a}\,v.$$

Таким образом, при малых скоростях легко находят массу Мопертюи $\frac{G}{v}$, которая, как мы видим, тождественна кинетической массе, полученной нами выше:

$$m_0 = \frac{2\mu_0 e^2}{3a}.$$

12. Случай больших скоростей. Если скорость перестает быть малой по отношению к V, то различные определения массы не будут совпадать для электромагнитной части инерции; все они приводят к значениям, которые, начиная от m_0 для малых скоростей, увеличиваются вместе с v и становятся бесконечными при пределе V.

Подобно тому, как кинетическая энергия

$$w = W_e + W_m - W_0$$

перестает быть пропорциональной квадрату скорости, так же и полное количество движения G перестает быть пропорциональным скорости и растет быстрее, чем последняя. Массу в смысле Мопертюи как функцию скорости мы будем определять, как и раньше, при помощи уравнения:

$$m = \frac{G}{v}. \tag{14}$$

Сейчас мы увидим, какое отношение существует между кинетической массой m_e и массой в смысле Мопертюи или массой m

в собственном смысле. С другой стороны, определение массы как коэфициента инерции при помощи уравнения $f = m\gamma$ приводит к электромагнитной массе, являющейся функцией лишь скорости, только в том случае, если совокупность обоих полей, окружающих наэлектризованное тело, определяется в каждый данный момент и на любом расстоянии наличной величиной скорости.

Это может быть лишь в том случае, если изменения скорости достаточно медленны и ускорение достаточно мало (такое движение называется квазистационарным) и если наэлектризованное тело, в силу своего ускорения, не испускает заметного излучения *. В данном случае излучение не уносит в бесконечность ни энергии, ни количества движения, и к нему можно применить принципы сохранения, считаясь исключительно с электромагнитным следом, определяемым скоростью; и тогда коэфициент инерции — функцию скорости — можно определить, деля силу на производимое ею ускорение.

Легко показать, что полученные результаты отличаются в зависимости от того, действует ли сила по направлению скорости, изменяя ее величину (тангенциальная сила f_l, продольная масса m), или же она действует по направлению, нормальному к скорости, изменяя при этом лишь направление последней (нормальная сила f_t, поперечная масса m_t).

В первом случае количество движения изменяется только по величине, и мы, из определения импульса, имеем:

$$dG = f_l\, dt.$$

С другой стороны, определение продольной массы как коэфициента инерции дает в этом случае:

$$f_l = m_l \frac{dv}{dt},$$

откуда

$$m_l = \frac{dG}{dv}. \tag{15}$$

Во втором случае количество движения изменяется только по направлению, не меняя своей величины. Если $d\alpha$ представляет угол изменения направления скорости и, следовательно, количества движения в промежуток времени dt, то, исходя из определения импульса, мы будем иметь:

$$f_t\, dt = G d\alpha.$$

* См. *P. Langevin*, Journal de Physique, 4 serie, v, 5. 1905.

Согласно определению поперечной массы m_t, мы получаем следующее соотношение:

$$f_t = m_t\gamma = m_t v \frac{d\alpha}{dt},$$

откуда

$$m_t = \frac{G}{v}.$$

Поперечная масса, таким образом, совпадает с массой в смысле Мопертюи.

Наконец, применяя принцип сохранения энергии, мы получаем:

$$dw = f_l\, dl = m_l v\, dv = v\, dG;$$

откуда для кинетической энергии:

$$w = \int_0^v v\, dG,$$

и для кинетической массы:

$$m_c = \frac{2w}{v^2} = \frac{2}{v^2}\int_0^v v\, dG. \qquad (16)$$

В случае, если G перестает быть пропорциональным v, оставаясь все же функцией скорости, уравнения (14), (15) и (16) выражают отношения между различными определениями массы. Однако, поскольку эти определения перестают совпадать, проще всего было бы сохранить только одно из них.

По многим основаниям, из которых наиболее существенным является простота, мы под массой будем подразумевать массу в смысле Мопертюи или поперечную массу $m = \frac{G}{V}$: именно она входит в измерения, относящиеся к движущимся наэлектризованным частицам (катодные лучи и β-лучи), когда наблюдают отклонения, производимые электрическими или электромагнитными силами, перпендикулярными к направлению лучей.

Назовем первичной массой величину m_0, общую (при малых скоростях) для различных определений массы.

Электромагнитная масса может быть получена как функция скорости делением на скорость количества движения, локализованного в электромагнитном следе наэлектризованного тела.

Впрочем, функция скорости, полученная для указанного количества движения, зависит от того, как «ведет себя» наэлектризованное тело в случае изменения скорости, т. е. сохраняет оно свою форму или же изменяет ее.

Максу Абрагаму наиболее простой казалась гипотеза о недеформируемости: если, например, наша сфера сохраняет свою

форму при всех скоростях, то, обозначая через β отношение $\frac{v}{V}$, мы получим:

$$m = \frac{G}{v} = \frac{3m_0}{4\beta^2}\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta}\log\frac{1+\beta}{1-\beta} - 1\right).$$

Но, с другой стороны, мы знаем, что Лоренц, чтобы понять отсутствие влияния движения Земли на электромагнитные и оптические явления, вынужден был допустить, что все тела, находящиеся в покое, по форме отличны от тел, которые равномерно и прямолинейно движутся, причем тело, находящееся в движении по отношению к наблюдателям, представляется последним сокращенным в направлении его скорости в отношении $\sqrt{1-\beta^2}$. Таким образом, находящаяся в движении сфера представляется сплющенным эллипсоидом. Учитывая это изменение формы при вычислении количества электромагнитного движения, мы получаем для массы m значение:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}. \tag{17}$$

Эта формула значительно проще формулы Макса Абрагама; *опыты, произведенные над β-лучами радиоактивных тел, показывают, что изменение массы отрицательных электронов со скоростью хорошо выражается* (в пределах точности измерений) *именно формулой Лоренца.*

Кроме того, с точки зрения принципа относительности, вполне достоверно, что любая масса, каково бы ни было ее происхождение, должна изменяться со скоростью, следуя именно закону Лоренца.

Исходя из формулы (17), легко получить законы изменения, соответствующие другим определениям массы. Непосредственно получают:

$$G = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad m_l = \frac{dG}{dv} = \frac{m_0}{(1-\beta^2)^{\frac{3}{2}}},$$

затем

$$w = \int_0^v v\,dG = m_0 V^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right), \tag{17'}$$

откуда

$$m_c = \frac{2m_0}{\beta^2}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right).$$

13. Давление Пуанкаре. Мы только что видели, что опыт подтверждает гипотезу сокращения Лоренца в отношении катодных частиц или свободных электронов: их масса изменяется со скоростью согласно закону, основанному на гипотезе об электромагнитной инерции.

Идея о том, что подобное сокращение может быть вызвано уже самым фактом движения тела, показалась сначала чрезвычайно странной. Эйнштейн выяснил, что эта идея соответствует только одному из аспектов новых понятий пространства и времени, введенных принципом относительности.

С совершенно другой точки зрения осветило механизм этого сокращения важное замечание А. Пуанкаре. Мы знаем, что существуют свободные отрицательные частицы, или катодные корпускулы, тождественные между собой и несущие индивидуальный заряд, равный примерно $4 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц CGS. Мы знаем также их начальную массу, равную 10^{-27} *г*, происхождение которой, повидимому, исключительно электромагнитное, но мы ничего не знаем об их структуре, а также о природе тех сил, которые обуславливают их целостность. Тем не менее очевидно, что, кроме электромагнитных сил, необходимы еще и другие силы внутри электрона, — для того чтобы воспрепятствовать распадению заряда вследствие взаимного отталкивания составляющих его элементов; при этом естественно предполагается (и это первое, что нам следует попытаться обосновать) правомерность распространения на внутренность электрона законов электростатики, установленных опытами, проделанными над телами обычных размеров.

Давление Пуанкаре дает нам, по крайней мере, простое представление о подобных силах. Представим себе заряд e электрона, находящегося в покое, распределенный по поверхности сферы радиусом a.

Взаимные электромагнитные действия между различными элементами этого заряда сводятся — при отсутствии движения — к хорошо известному электростатическому отталкиванию, которое стремится переместить наружу наэлектризованный слой с силой, равной на единицу поверхности $\frac{2\pi\sigma^2}{K_0}$, где σ представляет поверхностную плотность заряда $\frac{e}{4\pi a^2}$. Это отталкивание может быть уравновешено, если электрон подвергается давлению, исходящему от внешнего эфира и имеющему величину:

$$p = \frac{2\pi\sigma^2}{K_0} = \frac{e^2}{8\pi K_0 a^4}. \tag{18}$$

Если предположить, что подобное давление существует во всем пространстве, занятом эфиром, внешним по отношению к электронам, то каждый из последних будет находиться в равновесии именно в состоянии покоя, если он принимает сферическую форму с радиусом a, определенную предыдущим уравнением как функция его заряда и универсального давления p. Я не буду

распространяться здесь о том, что постановка и решение вопроса об устойчивости этого равновесия вызовут большие трудности.

А. Пуанкаре указал на следующий замечательный факт: если исходить из предположения, что электрон движется и что различные элементы его поверхностного наэлектризованного слоя подвержены указанному внешнему равномерному давлению, а также действию электростатических и электромагнитных сил Лоренца, исходящих от других элементов, то получается, что *формой равновесия как раз и будет указанный сплющенный эллипсоид Лоренца.*

Легко убедиться, что дело может обстоять именно так: действительно, мы видели, что электрическое поле распределено при движении не так, как в состоянии покоя, что оно ослабляется на полюсах и увеличивается на экваторе. Следовательно, у полюсов электростатическое давление уменьшается, и давление Пуанкаре, действующее извне, его превосходит; в результате электрон сплющивается у полюсов еще до того, как он обретет новое равновесие; на экваторе же он не расширяется, потому что электромагнитная сила Лоренца действует там в направлении, противоположном возросшему электростатическому давлению, и создает тем самым равновесие при том же экваториальном радиусе, как и в состоянии покоя. Получается, следовательно, эллипсоид с полярной полуосью, равной:

$$a\sqrt{1-\beta^2}.$$

Таким образом, для электрона мы имеем предварительную, простую картину, которая включает в себя сокращение Лоренца и находится в согласии с экспериментальным изменением инерции электрона в функции от его скорости. Следовательно, давление p в известной мере можно считать одним из существенных факторов в равновесии электрона.

На все это мы можем смотреть следующим образом: конфигурацией равновесия покоящегося электрона будет та, которая дает минимум для потенциальной энергии налагающихся здесь сил, а именно, электростатических отталкиваний и давления Пуанкаре.

Когда форма сферическая, с радиусом a, потенциальная энергия первых равна $\frac{e^2}{2K_0a}$, потенциальная же энергия внешнего давления будет равна произведению этого давления на объем электрона $\frac{3}{4}\pi a^3$; откуда получаем для всей потенциальной энергии в состоянии покоя:

$$E_0=\frac{e^2}{2K_0a}+\frac{4}{3}\pi a^3p.$$

Значение a, которое делает это выражение минимальным, как раз и дается формулой (18). Если теперь в выражении E_0 давление p заменить функцией радиуса, соответствующего состоянию равновесия, мы получим для всей потенциальной энергии покоящегося электрона, находящегося в равновесии:

$$E_0 = \frac{e^2}{2K_0a} + \frac{e^2}{6K_0a} = \frac{2e^2}{3K_0a}. \tag{19}$$

14. Масса и энергия. Сравнение этого выражения с выражением первичной электромагнитной массы m_0, даваемым формулой (4), приводит нас к следующему замечательному соотношению:

$$m_0 = K_0\mu_0E_0 = \frac{E_0}{V^2}. \tag{20}$$

Первичная электромагнитная масса электрона равна частному от деления его потенциальной общей энергии на квадраг скорости света.

Это же отношение мы найдем, если вместо сферического электрона будем рассматривать равновесную систему, подверженную, кроме электромагнитных сил, еще и такого рода воздействиям, что в результате конфигурация равновесия изменяется, следуя закону сокращения Лоренца, когда система приведена в движение.

При помощи одного из наиболее интересных и наиболее важных применений принципа относительности Эйнштейн сумел обобщить предыдущее отношение и распространить его на другие случаи, кроме рассмотренных выше случаев электростатического равновесия.

Независимо от Эйнштейна я, начиная с 1906 г., высказал и развил ряд соображений, которые изложены мной в лекциях в Коллеж де Франс в менее элементарной и более общей форме, чем здесь.

Ниже мы покажем, что присутствие электромагнитного излучения внутри пустой материальной полости соответствует для ее оболочки дополнительной инерции, определяемой энергией излучения, и что испускание или поглощение излучения материальной системой выражается изменением ее инерции, т. е. емкости ее количества движения, изменением, пропорциональным энергии излучения.

15. Принцип относительности. Все опыты, проведенные в целях обнаружения движения земных наблюдателей по отношению к среде, передающей электромагнитные действия, дали лишь отрицательные результаты, несмотря на исключительную, — какую только можно было достигнуть, — тонкость этих опытов. Тем не менее мы знаем, что для двух положений Земли,

диаметрально противоположных на орбите, например в июле и в январе, скорость изменяется примерно на 60 *км/сек*. Этот отрицательный результат позволяет, следовательно, утверждать, что электромагнитные явления, отнесенные к осям координат, связанным с Землей, представляются в одном и том же виде в любое время года и что фундаментальные законы, речь о которых шла выше, равным образом верны по отношению к двум системам осей, движущимся одна относительно другой со скоростью 60 *км/сек*. Другими словами, в действительности все происходит одинаково для различных наблюдателей, находящихся в равномерном и прямолинейном движении относительно друг друга; для каждого из них все происходит так, как будто он был неподвижен относительно эфира.

В частности, для всех наблюдателей одинаково верно как следствие основных законов, что электромагнитное или световое возмущение распространяется во всех направлениях с одной и той же скоростью:

$$V = \frac{1}{\sqrt{K_0\mu_0}}.$$

Уже из одного этого факта вытекают следствия, с первого взгляда чрезвычайно странные в отношении концепций пространства и времени, — следствия, не совместимые с понятиями пространства и времени, которых требует и которые постулирует рациональная механика. Прежде всего, появляется сокращение Лоренца в следующей форме: один и тот же объект, измеренный двумя группами наблюдателей, движущимися равномерно и прямолинейно относительно друг друга со скоростью $v = \beta V$, окажется в направлении движения короче в отношении $\sqrt{1-\beta^2}$ для тех наблюдателей, которые видят этот предмет проходящим мимо себя, чем для тех, которые с ним связаны. Аналогичные следствия существуют и для интервала времени между двумя событиями: например, одни и те же события, будучи одновременными для определенных наблюдателей, перестают быть одновременными для других наблюдателей, находящихся в движении по отношению к первым.

Как бы ни были странны эти следствия (которыми, впрочем, пользоваться здесь не придется), они вытекают из фактов, из самой структуры основных уравнений электромагнетизма. Эти уравнения могут иметь одну и ту же форму одновременно для различных групп наблюдателей, движущихся друг относительно друга, лишь в том случае, если сделанные ими измерения пространства и времени находятся в отношениях, о которых я уже напоминал. Иначе говоря, эти уравнения обладают группой преобразований, открытой Лоренцем, часть которой, относящаяся к пространству и времени, глубоко отлична от той,

которая соответствует группе преобразований уравнений обычной механики: существует несовместимость между двумя группами, и мы полагаем, что группа преобразований электромагнетизма — единственно правильная или что опыт обнаруживает нам только пространство и время группы Лоренца.

Мы используем в дальнейшем принцип относительности в очень простой форме; в уравнениях преобразования, которые связывают измерения одной и той же величины, сделанные двумя группами наблюдателей, движущимися равномерно и прямолинейно одна относительно другой, мы сохраним только члены первого порядка в функции относительной скорости.

Представим себе плоскую электромагнитную волну, изучаемую одновременно двумя наблюдателями O_0 и O_1, относительная скорость которых $v = \beta V$ предполагается нормальной к плоскости волны. Пусть эта скорость имеет такое направление, что O_0 видит O_1 движущимся в направлении, противоположном распространению волны, как бы бегущим навстречу волне; с другой стороны, O_1 видит O_0 движущимся с одной и той же скоростью v в направлении распространения, бегущим впереди волны, которая, впрочем, его настигает, поскольку v предполагается всегда ниже, чем V, и β — всегда меньше единицы.

В силу принципа относительности все результаты, которые мы получим, будут верными одновременно как для O_0, так и для O_1; в частности, для обоих наблюдателей волна распространяется с одной и той же скоростью V. Однако интенсивность этой волны для них будет разная: она будет более интенсивной и будет содержать бо́льшие электрические и магнитные поля для O_1, чем для O_0, т. е. для того наблюдателя, который двигается навстречу волне, чем для того, кто убегает от нее.

Этот результат мы могли бы вывести и из группы преобразований Лоренца, которая дает соотношение между измерениями одной и той же величины, например электрического поля волны, сделанными одновременно двумя наблюдателями. Однако, если мы ограничимся только членами первого порядка, которых, впрочем, для нас вполне достаточно, это отношение можно будет найти и другим путем.

Согласно определению, электрическое поле волны измеряется для наблюдателя O_1 силой, которая действует в волне на единичный электрический заряд, неподвижный по отношению к нему.

Пусть h_1 будет этой силой. Для наблюдателя O_0 рассматриваемый электрический заряд движется в направлении, противоположном распространению и нормально к волне, со скоростью v. Следовательно, этот заряд, с его точки зрения, подвержен не только электрической силе, но также и электромагнитной силе Лоренца, обусловленной его движением при нали-

чии магнитного поля волны. Поскольку это магнитное поле перпендикулярно электрическому, применение закона, выраженного формулой (9), показывает, что электромагнитная сила имеет то же направление, как и электрическая.

Если h_0 и H_0 являются двумя полями, существующими в волне для наблюдателя O_0, то сила, действующая на рассматриваемый нами единичный заряд, имеет своим значением:

$$h_0 + \mu H_0 v.$$

Однако, поскольку речь идет о плоской волне, между двумя полями существует отношение (7), откуда вытекает, учитывая (8), величина $h_0(1+\beta)$, измеренная наблюдателем O_0. Поскольку, кроме того, из принципа относительности следует, что измерения одной и той же силы, сделанные двумя наблюдателями, движущимися друг относительно друга, различаются только в членах второго порядка в функции их относительной скорости, то можно, с той же степенью приближения, написать:

$$h_1 = h_0(1+\beta). \tag{21}$$

И наоборот, для волны, распространяющейся в противоположном направлении по отношению к тем же наблюдателям, мы будем иметь:

$$h_1 = h_0(1-\beta). \tag{22}$$

Таким образом, волна всегда остается менее интенсивной для того из двух наблюдателей, который, как представляется другому, убегает от этой волны. Плотности энергии и количества движения в волне, даваемые соотношениями (11) и (12), одними и теми же по форме одновременно для обоих наблюдателей, не будут одинаковыми для них по величине и окажутся в отношении $(1+\beta)^2$ или $(1-\ )^2$, в зависимости от направления, в котором будет распространяться волна.

16. Инерция излучения. Рассмотрим теперь сосуд чрезвычайно простой формы, образованный из двух параллельных плоских пластинок, идеально отражающих своими обращенными друг к другу сторонами и расположенных на расстоянии d одна от другой. Предположим, что между пластинками заключен источник электромагнитного излучения какого-то спектрального состава, распространяющегося плоскими волнами, параллельными этим пластинкам. Эти волны будут отражаться поочередно от обеих пластинок и образуют излучение, заключенное внутри сосуда.

Пусть W_0 — электромагнитная энергия излучения на единицу поверхности пластинок с точки зрения наблюдателя O_0, неподвижного по отношению к сосуду. Каждое отражение от неподвижных пластинок изменяет только направление распространения волны, не меняя ее энергии; следовательно, для наблюда-

теля O_0 одна половина этой энергии существует в сосуде в форме волн, распространяющихся в одном направлении, а другая — в форме волн, распространяющихся в противоположном направлении.

В силу отношения (13), первая половина представляет количество движения, равное

$$G_0 = \frac{W_0}{2V}$$

в направлении распространения, и вторая половина — такое же количество движения, но обратного направления. Для наблюдателя O_0 излучение представляет, следовательно, в среднем нулевое количество движения. Отражение от пластинок сопровождается, кроме того, давлением излучения, возникающего в результате изменения направления количества электромагнитного движения волн в момент, когда они отражаются. Это давление равно в среднем плотности энергии излучения $\frac{W_0}{d}$. Следовательно, для того чтобы поддержать пластинки в равновесии, необходимо воздействовать на них снаружи давлением равной величины, которое уравняло бы давление, производимое излучением изнутри.

Это внешнее давление, необходимое для равновесия, представляет на единицу поверхности пластинок потенциальную энергию, равную pd, т. е. W_0. Таким образом, общая энергия E_0, которой располагает система в состоянии покоя, имеет своей величиной $2W_0$. В частности, именно эта энергия излучения выходила бы из сосуда, если бы пластинки, будучи несколько прозрачными, пропускали медленно наружу заключенное между ними излучение и если бы постоянное внешнее давление, действующее на них, приближало бы их друг к другу, по мере того как исчезало бы излучение.

Легко заметить, что в этих условиях работа pd, производимая внешним давлением, превращается в энергию излучения (во время отражений, происходящих от слегка придвигающихся пластинок) и что в момент, когда пластинки соединятся, энергия, излученная наружу, будет равняться $2W_0$, т. е. двойному количеству первоначальной электромагнитной энергии.

Внешнее давление играет здесь роль, аналогичную давлению Пуанкаре в случае электрона; оно должно войти тем же способом и в расчет общей энергии, которой располагает система, находящаяся, по предположению, под постоянным внешним давлением.

Однако так дело обстоит только в том случае, если это условие постоянного внешнего давления выполняется в течение всего времени приведения системы в движение для того, чтобы

данную систему можно было рассматривать остающейся одной и той же как в движении, так и в покое и считать, что система сохранила один и тот же вид для наблюдателей, с нею связанных и движущихся одновременно с самой системой *.

Как мы сейчас увидим, наблюдатель O_1, который видит данный сосуд проходящим мимо него со скоростью v, припишет ему определенное количество движения электромагнитного происхождения, локализованное в излучении, заключенном между пластинками. Действительно, поскольку волны для этого наблюдателя распространяются в направлении движения сосуда, то, с его точки зрения, они обладают количеством движения (в этом же направлении) большим, чем G_0 в отношении $(1+\beta^2)$:

$$G_1 = G_0(1+\beta)^2,$$

а волнам, распространяющимся в обратном направлении, будет соответствовать

$$G_1' = G_0(1-\beta)^2;$$

откуда в итоге для излучения количество движения, направленное параллельно движению сосуда, равно:

$$G = G_1 - G_1' = 4G_0\beta = \frac{2W_0}{V^2}v = \frac{E_0}{V^2}v.$$

Наличие излучения с энергией E_0 соответствует, следовательно, емкости количества движения или электромагнитной массе, опять-таки равной величине $\frac{E}{V^2}$.

17. Изменение массы в результате поглощения или испускания излучения. Изучим теперь последний случай — случай, когда тело испускает во внешнее пространство излучение, представляющее собой уменьшение ΔE_0 внутренней энергии тела и измеряемое наблюдателями, которые с ним связаны; мы увидим, что из указанного уменьшения энергии вытекает уменьшение первичной массы m_0, равное $\frac{\Delta E_0}{V^2}$. И наоборот, увеличение внутренней энергии вследствие поглощения излучения сопровождается аналогичным увеличением первичной массы.

Рассмотрим источник в виде плоской пластинки, излучающей своими лицевыми сторонами плоские волны, распространяющиеся в противоположные стороны нормально к поверхностям, и предположим, что это излучение симметрично для наблюдателя O_0, связанного с источником. Рассматриваемый источник посылает в противоположные стороны равные и противоположные

* Это вытекает из того факта, что давление является инвариантом преобразований Лоренца.

количества электромагнитного движения; в силу закона сохранения количества движения источник остается неподвижным для O_0 в течение всего времени лучеиспускания, например одной секунды. Если E_0 представляет собой всю энергию, излученную единицей поверхности источника в течение этого времени, то каждый поток волн, распространяющихся направо и налево, представляет для наблюдателя O_0 энергию $\frac{\Delta E_0}{2}$.

Какой аспект примет это явление для наблюдателя O_1? Наблюдатель O_1 видит источник движущимся, например, вправо со скоростью v. Волны, испущенные в правую сторону и имеющие для O_0 плотность энергии $\frac{\Delta E_0}{2V}$ (потому что занимают для него длину V), для O_1 будут иметь плотность $\frac{\Delta E_0}{2V}(1+\beta)^2$; кроме того, они займут для него лишь длину $V-v$, так как головная волна, испущенная в правую сторону в начале единицы времени, по истечении последнего будет находиться от своего отправного пункта на расстоянии, равном скорости V распространения, а хвостовая волна находится на пластинке, которая в этом же направлении пробежала расстояние v.

Следовательно, поток волн, излучаемый правой стороной источника, представит для O_1 энергию:

$$\frac{\Delta E_0}{2V}(1+\beta)^2\cdot(V-v)=\frac{\Delta E_0}{2}(1+\beta),$$

пренебрегая членами, содержащими β^2.

Этот поток, следовательно, представляет для O_1 количество движения, испущенное источником в правую сторону:

$$\Delta G_1=\frac{\Delta E_0}{2V}(1+\beta).$$

Таким же образом поток волн, излучаемый левой стороной источника, равный $V+v$ для наблюдателя O_1, представляет для него количество движения, испущенное источником в левую сторону:

$$\Delta G_1'=\frac{\Delta E_0}{2V}(1-\beta).$$

В итоге для наблюдателя O_1 источник испускает некоторое количество движения в правую сторону, т. е. в сторону его собственного движения:

$$\Delta G=\Delta G_1-\Delta G_1'=\frac{\Delta E_0}{V}\beta=\frac{\Delta E_0}{V^2}v.$$

В силу принципа сохранения источник должен был бы потерять это же самое количество движения; однако его скорость по отношению к O_1 не изменилась, потому что источник остается

неподвижным по отношению к O_0. Следовательно, уменьшилась его масса, т. е. частное от деления количества движения на его скорость:

$$\Delta m_0 = \frac{\Delta G}{v} = -\frac{\Delta E_0}{V^2}. \quad (23)$$

Мы приходим, таким образом, к следующему результату, имеющему капитальное значение:

Всякое изменение внутренней энергии материальной системы, обусловленное испусканием или поглощением излучения, сопровождается пропорциональным изменением ее инерции.

18. Изменение массы в зависимости от температуры. Исследуем, прежде всего, некоторые следствия последнего положения, некоторые обстоятельства, при которых изменение состояния материальной изолированной системы сопровождается изменением во внутренней энергии, наступающим в результате испускания или поглощения излучения.

Одна и та же часть материи может перейти от одной температуры к другой именно вследствие испускания или поглощения лучистой теплоты.

Из этого вытекает изменение массы, которое можно оценить, разделив на V^2 количество теплоты, обмененной с внешним пространством. Возьмем в качестве примера воду, обладающую чрезвычайно большой теплоемкостью; мы увидим, что масса воды, имеющая при 0° инерцию, равную 1 *г*, при 100° будет иметь бо́льшую инерцию, и разница получится путем деления поглощенной теплоты — 100 грамм-калорий, эквивалентных $4{,}18 \cdot 10^9$ эргов, — на V^2 или на $9 \cdot 10^{20}$, что даст приблизительно $5 \cdot 10^{-12}$, т. е. изменение почти нечувствительное. Этот пример хорошо показывает, несмотря на незначительность подсчитанного результата, каким образом понятие массы перестает, с теоретической точки зрения, смешиваться с понятием количества материи. Две равные массы воды с равной инерцией, взятые одна при 100° и другая при 0°, содержат не одно и то же количество материи; они перестают быть равными, когда их доводят до одинаковой температуры. Две массы воды, содержащие одинаковое количество молекул, имеют одну и ту же инерцию только в том случае, если они взяты при одинаковой температуре, т. е. если их внутренние энергии равны.

Рассмотрим более глубокие изменения состояния, соответствующие более существенным изменениям внутренней энергии и, следовательно, инерции.

19. Случай химических реакций. Предположим, что химическая реакция производится внутри закрытого сосуда, например запаянной стеклянной трубки. Теплота, выделяемая при реакции, рассеется путем излучения через оболочку, и из этого, согласно

вышеизложенному, должно следовать уменьшение инерции, которое легко рассчитать по формуле (23), пропорциональное излучаемой энергии. Порядок величин теплоты реакции таков, что изменения в массе, предвиденные на основании указанных соображений, чрезвычайно малы и недоступны для измерения.

Возьмем, например, одну из наиболее экзотермических реакций на единицу реагирующей массы — реакцию образования жидкой воды из ее элементов, взятых в газообразном состоянии. Образование 18 *г* воды высвобождает 69 тыс. грамм-калорий, эквивалентных примерно $3 \cdot 10^{12}$ эргов. Поскольку V^2 в той же системе единиц равняется $9 \; 10^{20}$, то теория предусматривает изменение массы, равное $\frac{1}{3} \cdot 10^{-8}$ *г*, т. е. относительную разницу в одну пятимиллиардную часть между массой гремучего газа и массой воды, которую он может образовать, взятыми при одной и той же температуре. Однако вряд ли мы можем обнаружить изменение инерции такого порядка.

20. Случай радиоактивных изменений. Радиоактивные тела являются ареной самопроизвольных процессов, при которых выделяются огромные количества энергии по сравнению с теми, которые высвобождают обычные химические реакции. Так, например, известно, что один грамм металлического радия высвобождает в час 130 калорий, одновременно переходя сам в радий D через последовательные формы эманации и радия A, B и C, и что он испускает гелий в форме α-частиц.

Количество радия, распадающееся в течение часа в одном грамме этого металла, впрочем, чрезвычайно мало, поскольку самопроизвольный распад радия совершается очень медленно. Средний срок жизни одного атома радия, как известно, равняется примерно 2600 годам. Таким образом, в течение часа в одном грамме радия разлагается масса, равная

$$\frac{1}{2600 \; 365 \cdot 24};$$

полное превращение одного грамма радия в гелий и радий D дало бы в эргах энергию: $130 \cdot 2600 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 4{,}18 \cdot 10^7 = 1{,}1 \cdot 10^{17}$.

И это представляет собой только один этап преобразований, начинающихся от урана и заканчивающихся свинцом. Мы должны, следовательно, заключить, что окончательные продукты эволюции данного количества урана (гелий и свинец) имеют общую инерцию, меньшую максимум на одну десятитысячную по сравнению с первоначальным ураном, потому что только для одного этапа перехода от первоначального радия в радий D мы имеем уменьшение массы, равное на один грамм:

$$\Delta m_0 = \frac{1{,}1 \; 10^{17}}{9 \cdot 10^{20}} = 1{,}2 \cdot 10^{-4}.$$

Каким образом обнаружить такое изменение инерции? Допустим, что потеря энергии через излучение (откуда и следует изменение массы) не сопровождается никаким изменением веса и что внутренняя энергия, которая, как мы знаем, имеет отношение к инерции, не имеет никакого отношения к весу. Из этого следовало бы, что определенное количество урана и конечных продуктов его распада, гелия и свинца, имели бы равные веса, но разные инерции: например, они не получали бы одинакового ускорения под действием силы тяжести. В одном и том же месте для различных веществ — урана, гелия, свинца и т. д. — должны были бы существовать различия в величинах ускорения силы тяжести g, по меньшей мере, равные десятитысячной доле, т. е. разности, вполне доступные для измерений.

Однако опыт показывает, что подобные разности не существуют, что закон постоянства g для всех тел в одном и том же месте подтверждается чрезвычайно точно: в каждом данном месте существует точная пропорциональность веса и инерции.

Наилучшим подтверждением этого закона является опыт, произведенный Этвешем при помощи крутильных весов. Его метод в конечном счете устанавливает, что направление вертикали в точности одно и то же для всех тел. Это направление представляет собой направление равнодействующей реального веса и центробежной силы вращения Земли; поскольку последняя (сила вращения) пропорциональна инерции, то равнодействующая, т. е. наблюденная вертикаль, не могла бы иметь одно и то же направление для всех тел, если бы для них не имелось постоянного отношения между весом и инерцией.

Этвеш утверждает, что это постоянство подтвердилось с точностью, по меньшей мере, до одной двадцатимиллионной; следовательно, мы очень далеки от отклонений, превышающих десятитысячные доли.

Из этого необходимо заключить, что если энергия инертна, она в то же время и весома в соответствующей пропорции; что изменение внутренней энергии сопровождается в то же время изменением массы и изменением веса *; что одно и то же тело

* В этих утверждениях Ланжевена есть непоследовательность, возникшая от некоторого смешения понятий. Ланжевен прав, говоря, что всякое изменение энергии связано с изменением массы. Но он неудачно выражает главную мысль данной своей работы, утверждая, что энергия инертна. В действительности весь ход рассуждений, проведенных здесь Ланжевеном, показывает, что инерцией (массой) обладает *не* энергия, а электромагнитное поле (излучение); вместе с тем поле обладает и энергией. Между массой m и энергией E электромагнитного поля (как и вещества) существует тесная взаимосвязь, выражаемая законом $E = mc^2$.

Между тем Ланжевен в данном случае совершенно неправильно отождествляет электромагнитное поле (излучение) с энергией. На основании этого он и пишет, что «энергия инертна». Этот недостаток нашел отражение и в самом названии данного доклада Ланжевена. — *Прим. ред.*

в теплом состоянии легче, чем в холодном; что вода легче, чем гремучий газ, из которого она образуется; что уран значительно тяжелее, чем продукты его самопроизвольного распада.

Эта весомость внутренней энергии, мешающая нам в обнаружении изменения инерции через посредство изменений g, может, с другой стороны, сделать более легкой экспериментальную проверку следствий теории; она позволяет заменить наблюдение изменения инерции значительно более легким наблюдением изменения веса, связанного со всяким изменением внутренней энергии ΔE_0 и измеряемого в граммах, так же как и изменение массы $\frac{\Delta E_0}{V^2}$.

Указанное нами не противоречит отрицательным результатам опытов, поставленных Ландольтом и другими для того, чтобы выяснить, сопровождается ли изменением веса химическая реакция, происходящая в закрытом сосуде.

Такое изменение мы, действительно, предусматриваем, но оно значительно меньше того, что́ могли бы обнаружить наши самые чувствительные весы, потому что это изменение для наиболее энергичных реакций было бы меньше одной десятимиллиардной части первоначального веса.

Нам остается рассмотреть радиоактивные превращения. Мы, конечно, могли бы заключить в запаянную трубку радий или уран и дожидаться — для установления изменения веса — чтобы самопроизвольное превращение было, если не законченным, то, по крайней мере, значительно продвинутым вперед. Однако на это потребовались бы сотни лет для радия и миллионы веков для урана. К счастью, столь длительное ожидание совершенно не нужно.

Чтобы проверить правильность наших предвидений, достаточно измерить атомные веса с точностью, превышающей одну десятитысячную, что, во всяком случае, возможно.

Действительно, если бы масса и, следовательно, вес одной и той же части материи в точности сохранялись в продолжение всего периода радиоактивных изменений, которые в ней (в массе) могут происходить, то из этого следовали бы простые отношения между атомными весами последовательных элементов. Для превращения, сопровождаемого исключительно эмиссией β- и γ-лучей, атомный вес не должен был бы меняться, так как новый атом, чтобы сделаться электрически нейтральным, должен был бы восстановить отрицательный электрон или электроны всегда одной и той же массы, которые были потеряны измененным атомом.

В случае испускания α-частиц или атомов гелия атомный вес уменьшился бы в точности на атомный вес гелия. Разности между атомными весами урана или радия и атомным весом

свинца, являющимся результатом их превращения, должны были бы быть целыми кратными атомного веса гелия. Если, напротив, наши заключения правильны, эти разности должны быть несколько большими — на количества, пропорциональные потерянным в процессе промежуточных преобразований энергиям.

Учитывая порядок величин этих атомных весов, превышающих 200, и количество тепла, освобождаемого при радиоактивных превращениях, эти отклонения касались бы второго десятичного знака. Отсюда понятна та большая теоретическая важность, которую имели бы измерения, сделанные с этой степенью точности.

21. Закон Праута. Но следует ли ожидать, пока будет достигнута указанная нами точность, чтобы сделать заключение? Мне кажется, что экспериментальным подтверждением инерции и весомости внутренней энергии является то, что́ в настоящее время уже вполне доказано, именно — отклонения от закона Праута *, т. е. тот факт, что атомные веса, хотя, очевидно, и являются целыми кратными одного и того же количества, тем не менее показывают небольшие отклонения от этой кратности. Действительно, атомные веса большинства элементов (принимая вес атома водорода за единицу) группируются вокруг целых чисел, не совпадая тем не менее с ними:

C = 11,91	N = 13,90	O = 15,87	F = 18,90
He = 4	Li = 6,94	Be = 9	B = 10,90
Na = 22,80	Mg = 24,12	Al = 26,90	Si = 28,10 и т. д.

Этот факт, безусловно, не может быть отнесен к области случайного, и он ставит существенный вопрос философии природы — вопрос о единстве материи, ответ на который мы можем дать уже теперь **. До тех пор, пока принцип сохранения материальной массы не вызывал сомнений, казалось невозможным

* В начале XIX столетия английский ученый Праут (1786—1856) выдвинул гипотезу, что атомы всех элементов построены из атомов водорода. Это предположение было вскоре отвергнуто, так как было найдено, что атомные веса элементов значительно уклоняются от целых чисел. Однако сейчас следует признать, что в догадке Праута была значительная доля истины, поскольку ядра атомов водорода (протоны) действительно являются важнейшей составной частью атомов всех элементов, а атомные веса чистых изотопов в высокой степени приближаются к целым числам. — *Прим. ред.*

** Крупнейшая заслуга не только научной постановки, но и положительного разрешения проблемы единства химических элементов, единства материи, принадлежит гениальному создателю периодической системы элементов, великому русскому ученому Д. И. Менделееву — *Прим. ред.*

примирить существование очевидных отклонений от закона Праута с привлекательной гипотезой о том, что различные атомы построены, исходя из одного или нескольких первоначальных элементов.

Открытие радиоактивных превращений принесло решающий аргумент в пользу этой гипотезы, но отклонения продолжают существовать, и нам необходимо понять их причину.

Объяснение, которое я предлагаю, вытекает непосредственно из того, что было изложено выше: отклонения могли бы произойти вследствие того, что образование атомов из первоначальных элементов (путем распада, как мы это видели в радиоактивности, или при помощи обратного процесса, еще не наблюденного до сих пор, который мог бы произвести тяжелые атомы) сопровождалось бы изменениями внутренней энергии путем испускания или поглощения излучения. Сумма весов образовавшихся атомов отличалась бы от суммы весов атомов превращенных на количество, равное частному от деления изменения энергии на квадрат скорости света. И отклонения таковы, что энергии, участвующие в этих процессах, были бы совершенно того же порядка, как и те, которые нами действительно наблюдаются в процессе радиоактивных превращений *.

Если, например, атом кислорода происходил бы от конденсации 16 атомов водорода или 4 атомов гелия, то для того, чтобы объяснить атомный вес 15,87 меньший 16, было бы достаточно допустить, что эта конденсация сопровождалась потерей энергии, только в пять раз большей, чем та энергия, которая выделяется во время превращения одного атома первоначального радия в радий D.

Не составляя особой загадки, эти отклонения, в которых мы увидели бы экспериментальное доказательство инерции и весомости энергии, принесли бы нам, напротив, важные знания о возможном родстве элементов и о величине энергий, использованных в процессе их трансформации.

---

* Высказанное здесь предположение оказалось не совсем правильным. Главная причина отклонений атомных весов от целых чисел (а эти отклонения бывают весьма значительными, например Cl = 35,46; Cu = 63,57; Hg = 200,61) состоит в явлении изотопии — существовании элементов с одинаковыми химическими свойствами, что является следствием одинакового заряда ядра, т. е. одинакового числа протонов в ядре, но отличающихся на несколько единиц атомными весами. Обычные природные химически простые вещества представляют собой смесь, в определенной пропорции, нескольких изотопов; измеряемый атомный вес есть лишь среднее из атомных весов этих изотопов.

Что же касается различий в массе, связанных с излучением энергии при атомных превращениях, то эти различия вообще гораздо меньше, однако они играют большую роль, так как служат мерой «энергии связи» частиц в атомном ядре (так называемые дефекты массы). — *Прим. ред.*

22. Материя — резервуар энергии. Мы видели, что всякое изменение внутренней энергии тела путем излучения сопровождается пропорциональным изменением его массы и его веса и что, с другой стороны, наличие аккумулированной энергии в виде излучения в закрытом пространстве или же в электростатической форме соответствует наличию массы и, следовательно, веса, всегда связанных одним и тем же способом с присутствующей энергией.

Можно ли считать, что вся инерция материи имеет лишь указанное происхождение? Принцип относительности приводит нас к мысли, что изменение массы со скоростью $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$, установленное прежде всего для электромагнитной инерции, обладает общей значимостью. Очевидно, что так же дело обстоит и с отношением $m_0 = \frac{E_0}{V^2}$. В таком случае каждой инерции соответствовало бы присутствие в системе, обладающей этой инерцией, количества энергии, равного произведению массы на квадрат скорости света, энергии, высвобождение которой должно бы соответствовать полному разрушению материальной структуры.

Не предрешая заранее, сумеем ли мы когда-нибудь достигнуть этой разрушительной силы и истощить резервы энергии, находящиеся в материи, мы уже сейчас можем, на основе высказанной выше гипотезы, оценить важность и громадную величину этих резервов. Каждый грамм материи, какова бы ни была ее природа, соответствует наличию внутренней энергии, равной $9 \cdot 10^{20}$ эргов, т. е. эквивалентен теплоте, которую дало бы сжигание $3 \cdot 10^{9}$ *г*, или 3 000 000 *кг* каменного угля.

То обстоятельство, что материя является инертной и весомой пропорционально содержащейся в ней энергии, приводит нас к убеждению, что принцип сохранения массы сливается с принципом сохранения энергии. В замкнутой системе, которая не обменивается энергией с внешним миром, общая масса сохраняется, но индивидуальные массы различных частей этой системы изменяются, и притом в такой мере, в какой возможен между ними обмен энергиями.

Новая динамика должна основываться на двух основных законах — сохранения энергии и сохранения импульса или количества движения. Однако оба эти закона не являются независимыми: с точки зрения принципа относительности, они представляют собой два различных аспекта одного закона — закона сохранения импульса вселенной. Индивидуальность каждой части материи не может быть охарактеризована — как это было раньше — лишь ее массой; теперь ее необходимо искать в коли-

честве и структуре элементов, атомов или молекул, из которых она образована.

Превращения, которые мы наблюдаем у радиоактивных тел, позволят, быть может, отодвинуть эту структуру за структуру изменяющихся атомов, т. е. за пределы химии, и находить индивидуальность каждой части материи в числе и природе первоначальных элементов, из которых построены атомы, катодные корпускулы и, возможно, положительные ядра атомов гелия и водорода. Тогда во всех изменениях, которым подвергается материя, неизменяемыми остались бы только количество и природа этих элементов, и при их посредстве можно было бы определять существенную природу материи.

23. Случай свободного излучения. Излучению, свободно распространяющемуся со скоростью света V, мы приписываем не только энергию E_0, распределенную с плотностью, данной формулой (12), но также и количество движения, имеющее, согласно формуле (13), плотность:

$$G = \frac{E_0}{V}$$

в направлении распространения. Излучению мы можем приписать также и массу, определяемую частным от деления количества движения на скорость, равную в данном случае V. Эта масса будет равна $\frac{E_0}{V^2}$ и всегда связана с энергией тем же отношением, что и в случае материи. Однако, в то время как материя — безразлично, содержащая или не содержащая скрытое излучение — может принимать скорость, изменяемую, по абсолютному значению, в пределах от 0 до V, энергия свободного излучения может перемещаться лишь со скоростью V.

24. Весомость света. Энергия, заключенная в материи, весома и в то же время инертна. Следует ли, исходя из этого, считать, что так же обстоит дело и для лучистой энергии, распространяющейся свободно? Следует ли считать, что световые или электромагнитные волны чувствительны к действию поля тяжести, как это имеет место в случае эквивалентной массы обычной материи? Понятно, что на эти вопросы следует ответить утвердительно: световые лучи отклоняются вблизи материи вследствие действия притяжения, и ньютоновский закон всемирного тяготения, в конечном счете, утверждает притяжение энергии энергией *. К такому заключению пришел Эйнштейн. Ему уда-

---

* С таким толкованием закона тяготення согласнться нельзя. Оно является результатом смешения понятий «излучения» (поля) н «энергин»; кванты света обладают энергней, но не являются просто энергией. Взаимодействуют друг с другом нменно частн матерни, а не энергнн, которымн онн обладают. — *Прим. ред.*

лось вычислить преломление, которое должно было бы произойти для света звезды (видимой в направлении около Солнца) вследствие прохождения через поле тяготения Солнца.

Возможно, что это предположение будет подтверждено экспериментально. Это — проблемы, безусловное разрешение которых принадлежит ближайшему будущему. Можно только удивляться необыкновенному обороту, благодаря которому теория световых волн, в свое время являвшаяся столь противоположной ньютоновской корпускулярной теории, после ее соединения с электромагнетизмом выводит заключение, что излучение инертно и весомо и обладает всеми атрибутами, которыми когда-то наделяли материю.

И тем не менее мы уже далеко ушли от исходной точки, потому что теперь мы сталкиваемся со следствиями, касающимися свойств той самой среды, которая передает волны, свойств, которые нам открыли работы Максвелла и Герца.

Разница между материей и излучением остается фундаментальной; ее следует искать в понятии структуры, в присутствии или отсутствии в материи наэлектризованных центров, могущих двигаться с изменяемой скоростью по отношению к среде, в то время как излучение распространяется в этой среде с вполне определенной скоростью.

25. Общие выводы. В заключение можно обобщить отношение, установленное между начальной массой m_0 тела и его внутренней энергией в положении покоя E_0, определенной наблюдателями O_0, неподвижными по отношению к телу; такое же отношение пропорциональности существует между массой m тела и его общей энергией E, измеренными наблюдателями O_1, по отношению к которым тело находится в движении. Мы всегда имеем:

$$m = \frac{E}{V^2}.$$

Действительно, мы видели, что между массой тела, находящегося в движении, и его первичной массой, между массами одного и того же тела, измеренными одновременно наблюдателями O_0 и O_1, имеет место соотношение (17):

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

С другой стороны, из принципа относительности вытекает, что то же соотношение имеет место и между энергиями E_0 и E, измеренными наблюдателями O_0 и O_1:

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1-\beta^2}}. \qquad (24)$$

Отношение (20) и приводит к указанному обобщению в силу формул (17) и (24). Следовательно, можно сказать, что общая энергия тела, находящегося как в движении, так и в состоянии покоя, равна произведению его массы на квадрат скорости света V^2. Если — как это многократно предлагалось с серьезными основаниями — скорость света в пустоте принять за основную единицу, то можно было бы сказать: *масса тела равна его общей энергии*; таким образом, посредством числового равенства мы передали бы тождественность природы, которая обнаружена нами между массой и энергией *: *масса тела измеряет его внутреннюю энергию*.

Так как $\sqrt{1-\beta^2}$ всегда меньше единицы, то из формулы (24) вытекает, что энергия одного и того же тела (приведенного в движение без изменения его формы для наблюдателей, которые с ним связаны) в движении значительно больше, чем в состоянии покоя. Согласно нашему определению, эта разница представляет собой кинетическую энергию, и полученный результат объясняет нам формулу (17′), внешне несколько сложную, которую мы вывели для кинетической энергии W. Два выражения $\frac{m_0V^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ и m_0V^2, разностью которых W является, представляют собой не что иное, как два измерения общей энергии одного и того же тела, сделанные последовательно в состоянии его движения и в состоянии покоя.

---

* Эти рассуждения нельзя признать убедительными. Обсуждающийся в этой работе Ланжевена закон $E = mc^2$ устанавливает *взаимосвязь* энергии и массы, а отнюдь не их тождество. Никаким искусственным изменением выбора единиц измерения для обращения численного значения скорости света в единицу нельзя уничтожить различия *природы* массы и энергии. В противном случае всегда оказывалось бы возможным «отождествлять» любые из двух физических величин, связанных в каком-либо одном законе с помощью третьей величины. Так, например, мы могли бы «отождествить» силу и ускорение или ускорение и массу, искусственно подбирая единицы измерения в законе Ньютона: сила = масса $\times$ ускорение. — *Прим. ред.*

ФИЗИКА ПРЕРЫВНОСТИ *

Глубокое изменение, происшедшее недавно в физике, характеризуется, главным образом, проникновением во все области нашего знания основного понятия прерывности. В настоящее время мы должны строить наше познание мира и наши предположения о явлениях природы, исходя из существования молекул, атомов и электронов. Необходимо также допустить, что все магнитные моменты являются целыми кратными общей их основы — магнетона и что материя может давать электромагнитное излучение только прерывно, посредством квантов энергии, величина которых пропорциональна частоте.

Мы еще очень мало знаем точные индивидуальные законы, управляющие всеми этими элементами, равно как и их соотношениями. Весьма вероятно, что большую часть этих законов нельзя будет выразить языком дифференциального и интегрального исчислений, созданных для передачи аналитическим путем понятия о непрерывности. Этот удивительный метод подходит только для изучения систем, воспринимаемых нашими чувствами, которые в общем слагаются из огромного числа отдельных элементов. Величины, доступные для наших способов измерения, охватывают обычно одновременно так много элементов в виде суммы или среднего значения отдельных величин, что мы можем, допуская небольшую поправку, считать их непрерывными.

Но свойства таких совокупностей, естественно, определяются путем элементарных, приводимых нами ниже законов, и мы можем понять явления лишь при условии возможности установления связи между их внешней стороной и их внутренней сущностью, которую нам открывает опыт. Задача, которую нам необходимо выполнить, состоит в установлении связей между внешним и внутренним, между свойствами составных частей и свойствами целого, с тем чтобы объяснить это целое, когда известны элементарные законы, или — еще чаще — чтобы постичь эти законы по чуть заметным далеким отзвукам, которые мы только и можем воспринять. Мы не можем избежать этой необходимости:

* Доклад, прочитанный на заседании Французского физического общества 27 ноября 1913 г. — *Прим. ред.*

существование элементов — бесспорный факт; нам открывается новый мир, законы которого управляют всей физикой. Мы должны положить все усилия, чтобы постичь их, и можно надеяться, что они будут менее сложны, чем их отдаленные следствия, т. е. чем средние, или статистические, результаты, к которым мы привыкли.

Часто случается, что особенная форма индивидуальных законов стушевывается и исчезает, когда мы переходим к свойствам целого, в котором некоторые свойства являются только результатом очень большого числа имеющихся элементов и поэтому подчинены исключительно статистическим выводам.

Весьма вероятно, что принцип Карно, закон о самопроизвольном распаде радиоактивных веществ, закон действия масс и многие другие принадлежат к этой категории и являются всецело законами больших чисел. Совершенно очевидно, что в таком случае они должны, как и все законы больших чисел, давать повод к отклонениям и колебаниям, тем более значительным, чем к более простым системам, охватывающим меньшее количество элементов, их применяют. Всем известно, что наблюдение над отклонениями в весьма различных областях принесло нам убедительные аргументы в пользу существования прерывных элементов и дало общий и точный метод определения количества и величины этих элементов. Чтобы создать эту физику прерывности, становящуюся в настоящее время необходимостью, следует использовать данные статистики и беспрестанно пользоваться вычислениями теории вероятностей, являющейся единственно возможной связью между миром атомов и нами, между элементарными законами частиц и нашими наблюдениями *. Введение в физику теории вероятностей было впервые осуществлено Максвеллом и применено в связи с кинетической теорией газов. Легко себе представить, что применение этого способа расчетов,

* Действительно, в современной физике роль теории вероятностей очень велика. Во многих случаях явления микромира рассматриваются лишь со статистической точки зрения. Но нельзя согласиться с тем, что теория вероятностей является *«единственно возможной* связью между миром атомов и нами», как утверждает Ланжевен. Физика знает способы наблюдения и изучения *индивидуальных* явлений и свойств микромира, и статистическое рассмотрение их далеко не является «единственно возможным». Счет сцинтилляций (вспышек света) под действием α-частиц есть счет индивидуальных действий этих частиц. В опытах по измерению заряда электрона измеряется заряд индивидуальных ионов. В камере Вильсона на толстослойных фотопластинках Мысовского и Жданова прослеживаются пути одиночных элементарных частиц. Электрические счетчики Гейгера фиксируют действия отдельных микрообъектов, определяют направления их полета и т. п. Законы сохранения энергии и импульса управляют отдельными, индивидуальными актами взаимодействия фотонов и электронов. В справедливости этих законов мы убеждаемся именно на основе изучения индивидуальных микропроцессов, *минуя* теорию вероятностей. — Прим. ред.

зачастую весьма сложного, к совершенно новой области, не могло осуществиться сразу; еще многое остается сделать в этом направлении. Первые заключения Максвелла страдали отсутствием необходимой точности и вызвали возражения, которые наряду с трудностью вычислений препятствовали большинству физиков уделить кинетической теории заслуженное ею внимание и признать все совершенство полученных результатов. Больцман продолжил работы Максвелла и полностью оценил то значение, которое должна получить теория вероятностей в молекулярной физике. Одновременно с Гиббсом, но, как мне кажется, с большей точностью ему удалось создать статистическую механику, показав, как следует определять вероятность для динамической системы и привести ее в соответствие с заданными условиями для определенного состояния. Во всех этих вопросах основная трудность заключается, как мы увидим ниже, в том, чтобы дать точное и ясное определение вероятности. Все остальное относится к области вычислений. Перешагнув этот решающий рубеж, Больцман смог дать статистическое истолкование принципа Карно и скрытого смысла основного понятия энтропии. Благодаря толчку, данному Больцманом, а также стараниями его последователей, статистические расчеты проникли теперь во все области физики и скоро будут играть в ней ведущую роль.

Несмотря на чрезвычайное разнообразие применений этих расчетов, в основном они очень просты, и я хочу показать на примерах, что большинство из них сводится к двум основным, хорошо известным для математиков приемам, которые появились с момента возникновения теории вероятностей.

В первой группе вопросов следует искать возможно более вероятное распределение или конфигурацию, которую может принять система частиц или элементов, подчиненных данным условиям. Это в основном проблема состояния равновесия и постоянных режимов (уравнение состояния жидкостей, статистика газов, теории магнетизма, электро- и магнито-оптических явлений, теории излучения и теплоемкостей, статистическое объяснение законов термодинамики).

Ниже я покажу, что для придания некоторым вопросам полной ясности, как, например, вопросу об уравнении состояния жидкостей или об осмотическом давлении, необходимо решить определенную проблему вероятности геометрического характера и вероятного распределения.

Во второй группе вопросов стремятся предусмотреть значение самопроизвольных флюктуаций системы около этого распределения или конфигурации, которая наиболее вероятна, но не является единственно возможной, а лишь наблюдается в среднем.

Это всеобщее колебание около жестких конфигураций, предусматриваемых термодинамикой, тесно связано с прерывностью

структуры, т. е. с тем, что наши системы состоят, хотя и из очень большого, но все же не бесконечного числа элементов.

Поэтому его изучение приобретает особое значение, так как оно дает нам основной способ, посредством которого можно определить наличие элементов и подвергнуть их измерению.

Чтобы дать более ясное понятие о том, как одни и те же рассуждения и вычисления теории вероятностей можно применить к столь многочисленным и разнообразным проблемам физики, я начну с рассмотрения хода этих рассуждений в самых несложных случаях, в таких, применение которых всем знакомо и которые взяты из области азартных игр, как, например, орлянка или рулетка. Вам покажется менее удивительным, что, играя в орлянку, можно разрешить вопросы физики, когда вы хорошо уясните себе, что вся теория вероятностей, как бы она ни была проста с виду, имеет фактически ту же основу, как и все наши теории, и что, изучая задачи, поставленные азартными играми, мы занимаемся физикой.

Говорят в шутку, что все верят в законы случайности: математики — потому, что они видят в них результаты физических исследований, а физики — потому, что считают их математическими теоремами. В действительности же эти законы выводятся на основании вполне строгих рассуждений из самых простых постулатов, введенных априори в определении вероятностей. Эти постулаты сводятся к общему утверждению эквивалентности различных возможных случаев, когда отсутствуют причины, благоприятствующие одним случаям за счет других, к утверждению равной вероятности того, что рулетка остановится на красном или на черном или же что брошенная монета упадет на «орла» или на «решку».

Эти постулаты играют здесь ту же роль, что и наши гипотезы, которые лежат в основе физических теорий и из которых мы стараемся путем возможно более строгого анализа вывести заключения; сравнение последних с опытными данными дает нам возможность узнать, оправдываются ли фактически эти гипотезы и можем ли мы продолжать ими пользоваться для того, чтобы восполнить наше представление о вселенной. Точно так же сравнение с фактами законов больших чисел, строго связанных с нашими постулатами, дает нам возможность узнать, действительно ли они точны, нет ли обмана в рулетке и не имеется ли на монете маленького кусочка свинца на одной из сторон.

Всякое рассуждение теории вероятностей имеет своей целью сравнить постулаты теории с фактами, подобно тому как наши физические теории дают возможность сопоставить гипотезы с данными опыта. Как в том, так и в другом случае строгая связь существует лишь между постулатами или гипотезами и законами, которые из них вытекают. Соответствие между законами и

фактами не всегда имеет место, поэтому только путем сравнения можно решить, в какой мере мы можем сохранить наши исходные положения.

Мы занимаемся физикой, делая выводы из опытов, полученных от игры в орлянку. Представим себе игру, в которой монеты падают преимущественно на лицевую сторону; мы видим, что монета асимметрична и с лицевой стороны утяжелена свинцом. Чтобы уверенно перейти от известных фактов к причинам, необходимо, как и при изучении физики, возобновить опытную проверку несколько раз. В физике все кончается так же, как и в игре, — вопросом вероятности причин, вроде задачи, поставленной Анри Пуанкаре: «Я играю в карты с неизвестным мне господином; он открывает три раза подряд короля; какая же вероятность, что он шулер?»

Расхождение между опытом и выводом из теории вероятностей при предположении, что игра ведется честно, покажет, в какой мере это предположение справедливо. Уверенность оправдается, если опыт даст один и тот же результат. На этом же основывается и уверенность в теориях физики. Мы верим в наши представления и наши гипотезы ввиду постоянной согласованности математических выводов с данными опыта. В теории вероятностей занимаются, во-первых, математическими вычислениями, выводя при этом законы случая из постулатов, и, во-вторых, физикой — сравнивая законы с фактами для того, чтобы сделать выводы о правильности постулатов.

Кроме несомненной ясности, вытекающей из того, что постулаты, определяющие вероятности, интуитивны и просты, мы, изучая вопросы, поставленные азартными играми, находим еще одно преимущество: эти игры имеют дело с прерывными вероятностями, т. е. такими, где различные возможные случаи находятся в ограниченном количестве, причем непрерывный переход от одного к другому невозможен. Например, при данном совокупном числе бросаний в рулетку число попаданий в черную клетку может изменяться только прерывно, так как это число должно быть безусловно целым.

Напротив, с первого взгляда может показаться, что физика ставит задачи исключительно на непрерывность вероятностей, когда число возможных случаев бесконечно и образует непрерывный ряд. В частности, это имеет место в определенном промежутке времени самопроизвольного распада радиоактивного атома. Число моментов, в которое может произойти взрыв, бесконечно, а вернее, сверхбесконечно, так как их совокупность непрерывна.

Примерно то же самое, хотя бы только внешне, представляет собой совокупность конфигураций, которые может принять динамическая система. Законы, относящиеся к непрерывности веро-

ятностей, являются предельными формами, к которым стремятся результаты прерывных вычислений, когда можно предположить, что число вероятных случаев безгранично увеличивается.

Более простым путем, путем непосредственных рассуждений, можно получить формулы, применимые к проблемам непрерывности. Однако полезно было бы располагать более общими формами, относящимися к прерывности во всех возможных случаях. Действительно, один из наиболее неожиданных и загадочных результатов, которые дало нам сравнение с опытными данными, состоит в том, что в большом количестве проблем, таких, как проблемы равновесного теплового излучения или удельных теплот, экспериментальные законы согласуются с гипотезой прерывной вероятности, а отнюдь не с результатами, выведенными с полной точностью из постулата непрерывности. В этом состоит совершенно новая и оригинальная сторона физики прерывности, физики квантов. Согласно последней, для уяснения фактов мы должны не только применять теорию вероятностей к кратным определенных элементов, из которых состоит материя; необходимо в самих рассуждениях учитывать прерывность совсем другого порядка и действовать так, как если бы конфигурации, которые эти системы элементов могут принимать, изменяются только прерывно.

ПРОБЛЕМА ПЕРВАЯ

Вероятность распределения. Один из первых вопросов, возникающих в связи с игрой в рулетку, есть вопрос распределения бросаний шара, вызывающих появление определенного цвета, например черного, через последовательные интервалы времени, на каждый из которых падает одинаковое число бросаний. Сначала мы рассматриваем задачу в таком виде: предположим, что в течение m указанных интервалов времени черный цвет вышел всего N раз; какая будет вероятность, что в данном отдельном интервале он выйдет данное число n раз? Чтобы найти эту вероятность, определяемую обычно отношением числа благоприятных случаев к числу возможных, следует вычислить каждое из этих количеств, исходя при этом из упомянутых постулатов. Мы замечаем, что каждое выпадение в рулетке совершенно индивидуально, и по мере перехода от одного выпадения к другому изменяются и условия, которые сопровождают игру и определяют вышедший цвет. Обозначим символами α, , $\beta, \ldots, \zeta$ группы обстоятельств, определивших N бросаний, в которых вышел «черный». Нам неизвестны подробности этих обстоятельств, и, следовательно, мы не можем в каждом отдельном случае предвидеть то, что произойдет. Поэтому в качестве основного постулата необходимо принять, что каждая из этих групп обстоятельств

может проявиться безразлично в какой-то из m интервалов. В качестве второго постулата мы, естественно, допускаем, что эти группы совершенно независимы одна от другой, что игры рулетки сменяются, не оказывая друг на друга никакого влияния, и что появление особой группы обстоятельств в определенном интервале никак не отражается на положении групп в других интервалах. Каждый из интервалов, включающий всегда одну и ту же сумму ударов, считается как бы равноценным другим с точки зрения возможности появления в нем определенной группы обстоятельств, например α. Говоря обычным языком, предполагается, что эти группы распределены между интервалами случайно. Все возможные распределения N групп в m интервалах будем считать эквивалентными и обладающими одинаковой вероятностью по определению, причем количество этих распределений, или число возможных случаев, легко вычислить. Если группа α проявляется в определенном интервале, мы придадим α индекс, равный порядковому числу интервала, т. е. индекс может быть 1, 2, 3,... до m.

Число различных способов распределения m индексов между N группами или групп между интервалами будет, очевидно, n^N. Это и есть число возможных случаев.

Если мы поставим перед собой задачу — найти вероятность того, чтобы из N выпадений n пришлось бы в первом интервале, мы должны искать число распределений, в которых n символов α, β,... будут иметь индекс 1, другие же индексы будут отличаться от единицы и будут любыми другими индексами. Это даст нам число благоприятных случаев. Действительно, n символов с индексом 1 в распределении представляют собой одно из сочетаний из N символов по n.

К этому особому сочетанию могут быть присоединены все распределения остающихся $m-1$ индексов между $N-n$ других символов. Их число равно $(m-1)^{N-n}$, а так как возможны $\frac{N!}{n!(N-1)!}$ различных сочетаний, то в итоге имеем $\frac{N!}{n!(N-n)!}(m-1)^{N-n}$ для числа благоприятных случаев. Отсюда выводим для искомой вероятности

$$P_n = \frac{N!}{n!(N-n)!}\left(\frac{1}{m}\right)^n\left(1-\frac{1}{m}\right)^{N-n}. \quad (1)$$

Легко проверить, как это и должно быть, что сумма вероятностей, полученных для различных возможных величин n — от нуля до N, — равна 1, так как сумма всех P_n — не что иное, как разложение, согласно формуле бинома, выражения

$$\left(\frac{1}{m}+1-\frac{1}{m}\right)^N,$$

т. е. тождественно равна единице.

Нетрудно также проверить, что P_n имеет максимум для значения n, равного наибольшему целому числу, содержащемуся в $\frac{N+1}{m}$, т. е. в точности равно среднему числу $\nu=\frac{N}{m}$ игр в интервале, если это число целое. Этот результат можно было легко предвидеть, так как самое вероятное распределение N игр между равноценными интервалами m является, очевидно, равномерным распределением игр из расчета ν на интервал.

Игрока интересуют в основном колебания именно около этой средней величины, ибо от них зависит выигрыш или проигрыш. Вероятность этих колебаний указывается формулой (1).

Эту формулу можно выразить и в более простом виде, если предположить, что среднее ν соответствует очень большому числу m интервалов. Для очень большого m легко найти в качестве предельной формы (1), что

$$P_n = e^{-\nu} \frac{\nu^n}{n!} \cdot \tag{2}$$

Вероятности, соответствующие различным величинам n, получаются при умножении $e^{-\nu}$ на последовательные члены разложения в ряд $e^{-\nu}$. Сумма все еще равна 1, и максимум получается для $n=\nu$, если ν есть целое число, или для наибольшего целого, которое содержит ν. Если в рулетке «красное» и «черное» равновероятны, что является независимым постулатом от сделанных нами ранее, то среднее ν «черных», приходящееся на большом числе интервалов, видимо, равно половине числа ударов, сыгранных в каждом из этих интервалов.

Закон отклонений. Если в формулу (2) вместо числа n мы введем отклонение $\delta = n - \nu$ от среднего и если, далее, предположим, что n — достаточно большая величина, чтобы можно было ν заменить $n\,!$ хорошо известной формулой Стирлинга, то вероятность отклонения δ примет форму:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi\nu}} e^{-\frac{\delta^2}{2\nu}}, \tag{3}$$

которая в точности соответствует закону погрешностей Гаусса. Если вместо абсолютного отклонения δ мы введем относительное отклонение $\varepsilon = \frac{\delta}{\nu}$, то получим:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi\nu}} e^{-\frac{\nu\varepsilon^2}{2}}. \tag{4}$$

Последняя форма выявляет основной факт (к которому я вернусь, когда буду рассматривать теорию флюктуаций), а именно, что вероятность данного относительного отклонения ε тем меньше, чем больше величина ν, т. е. чем больше среднее количество

ударов в каждом интервале. Отсюда вытекает, что мы имеем возможность вывести это число ударов из наблюдения отклонений.

То же самое, только в другой форме, мы установим и при вычислении по общей формуле (1) вероятной величины среднего квадрата относительных отклонений ε, полагая

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\nu} = \frac{n-\nu}{\nu};$$

так как P_n является вероятностью отклонения ε, то в результате получается следующая формула для вероятной величины среднего квадратичного:

$$\overline{\varepsilon^2} = \sum_{n=1}^{n=\infty} P_n \varepsilon^2.$$

Простое вычисление дает при замене P_n величиной (1) следующее:

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{1}{\nu} - \frac{1}{N}. \qquad (5)$$

Если вместо среднего квадратичного мы введем сумму $\Sigma\varepsilon^2$ квадратов отклонений от среднего в m интервалах, то вероятная величина этой суммы будет $m\overline{\varepsilon^2}$ и удовлетворит соотношению

$$\frac{\Sigma\varepsilon^2}{m-1} = \frac{1}{\nu}. \qquad (6)$$

Таким образом, мы видим, что относительные отклонения или флюктуации n около своего среднего значения должны значительно уменьшаться по мере того, как увеличивается это среднее значение.

Как я уже указывал, действительное значение этих результатов следующее: они представляют основу теории, опирающейся на гипотезы, и позволяют (путем сравнения с данными опыта) узнать, можем ли мы сохранить эти гипотезы.

Игрок, который решил удостовериться в честности игры, будет пользоваться этими гипотезами так же, как мы пользуемся нашими теориями физики, когда проверяем правильность наших представлений путем сравнения их результатов с опытными данными. Только постоянство совпадений может дать нам как в игре, так и в физике уверенность в правильности предполагаемых причин и явлений.

Другой метод. Мы можем получить основные формулы (5) и (6), исходя из других положений и отыскивая вероятность не только того, чтобы на N выпадений приходилось определенное число n в одном из m равноценных интервалов, но и того, чтобы N выпадений распределялись между интервалами определенным

образом $n_1, n_2, \ldots, n_m$, т. е. так, чтобы одновременно n_1 выпадений было в первом интервале, n_2 — во втором и т. д. В этом случае мы не можем применить теорему сложных вероятностей и воспользоваться формулой (1), вычисляя P_{n_1}, P_{n_2} ... и перемножая эти величины вероятностей. Действительно, величины $n_1, n_2, \ldots$ не являются независимыми, так как их сумма должна быть равна N. Однако формулу (1) мы все-таки можем использовать, поступая следующим образом:
вероятность n_1 выпадений в первом интервале равна:

$$\frac{N!}{n_1!(N-n_1)!}\left(\frac{1}{m}\right)^{n_1}\left(1-\frac{1}{m}\right)^{N-n_1};$$

другие $m-1$ интервалов могут включать только $N-n$ выпадений, и вероятность того, что первый из них будет содержать n_2 выпадений, будет аналогична

$$\frac{(N-n_1)!}{n_2!(N-n_1-n_2)!}\left(\frac{1}{m-1}\right)^{n_2}\left(1-\frac{1}{m-1}\right)^{N-n_1-n_2}$$

и так далее. Если мы теперь образуем произведение всех этих вероятностей, то для искомой вероятности получим:

$$\frac{1}{m^N}\,\frac{N!}{(n_1)!\,(n_2)!\ldots(n_m)!}.$$

Другими словами, если полное число возможных распределений равно m^N, то количество способов, посредством которых можно получить в различных интервалах указанное распределение, будет:

$$W=\frac{N!}{(n_1)!\,(n_2)!\ldots(n_m)!}. \tag{7}$$

Мы могли бы получить этот результат более непосредственно, отыскивая возможные способы распределения между N символами групп $\alpha, \beta, \gamma, \ldots, \zeta$ определенного числа индексов каждого типа: n_1 — индексов 1, n_2 — индексов 2,..., n_m — индексов m. Каждое распределение соответствует одному из порядков, в которых можно распределить эти N индексов, которые при их перестановке не все различны. Искомое число будет числом полных перестановок N предметов, из которых n_1 будет одного вида, n_2 — другого вида и т. д. Результат представлен именно формулой (7).

Число способов W, посредством которых можно осуществить данное распределение $(n_1, n_2, \ldots n_m)$ указанных N символов между m эквивалентными интервалами с точки зрения возможного присутствия каждого из них, пропорционально — с наличием коэфициента $\frac{1}{m^N}$ — вероятности этого распределения. В качестве меры вероятности мы будем пользоваться величиной W.

Очевидно, что для данной величины N число W является максимальным в том случае, когда все n равны. Таким образом, мы видим, что самое вероятное распределение — то, которое осуществляется равномерно между разными интервалами, по крайней мере в том случае, когда не введено никакого другого дополнительного условия, которое могло бы исключить некоторые распределения. Разберем задачу, где встретятся такие исключения.

Формула (7) также дает способ вычислить отклонения от равномерного распределения максимальной вероятности. Действительно, если ν является средней величиной $\frac{N}{m}$ количества выпадений в одном интервале и $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_m$ — относительные отклонения от этой величины в каком-либо распределении, то

$$n_1 = \nu(1+\varepsilon_1), \quad n_2 = (1+\varepsilon_2), \ldots, \quad n_m = \nu(1+\varepsilon_m).$$

Тогда при самом вероятном распределении все ε равны 0, и так как общая сумма N дана, то во всех случаях мы будем иметь условие $\Sigma\varepsilon = 0$. Взяв логарифм обоих членов формулы (7) и заменив каждый множитель асимптотической формулой Стирлинга

$$n! = \sqrt{2\pi n}\left(\frac{n}{e}\right)^n,$$

пренебрегая логарифмом каждого большого числа, такого как n, по отношению к этому же числу, мы получаем, вводя константу C, зависящую только от N:

$$\log W = G - \sum_1^n n \log n.$$

Заменяя n через $\nu(1+\varepsilon)$ и развертывая $\log(1+\varepsilon)$ по степеням ε, мы получаем, если примем в расчет условие $\sum\varepsilon = 0$ и если ограничимся развертыванием до членов второго порядка,

$$\log W = \log W_0 - \frac{\nu\varepsilon^2}{2}$$

или

$$W = W_0 e^{-\frac{\nu\Sigma\varepsilon^2}{2}},$$

где W_0 будет максимальная вероятность, соответствующая равномерному распределеиию.

Имея, таким образом, вероятность, соответствующую каждой системе величин ε, легко можно вычислить среднюю величину любого выражения x (подобного $\sum\varepsilon^2$) посредством:

$$\frac{\Sigma\, W_0 x}{\Sigma W}.$$

Заменяя каждую из двух сумм интегралом и принимая в расчет условие $\sum\varepsilon = 0$, мы найдем формулу (6):

$$\frac{\sum\varepsilon^2}{m-1} = \frac{1}{\nu} \quad \text{(в среднем).}$$

Хотя второй способ рассуждения менее точен, чем первый, и может применяться только в случаях больших чисел, однако мы сочли необходимым напомнить о нем, так как он дает возможность рассматривать явления с новой точки зрения и подготавливает почву для решения задач, с которыми мы встретимся впоследствии.

Применение. Как в игре, так и в физике можно производить два рода применений соотношения (6). Прежде всего, как я уже указывал, его можно использовать, чтобы проверить посредством его сравнения с фактами, насколько оправданы постулаты независимости и безразличности, лежащие в основе наших рассуждений. Игрок, решивший убедиться в честности игры, должен прежде всего заметить числа выигрышей, выпавших в эквивалентных интервалах m; вычислив среднюю величину ν и относительные индивидуальные отклонения ε, он увидит затем, в какой степени проверено соотношение (6). Эта проверка будет тем более точной, чем больше число m рассмотренных интервалов.

Точно так же соотношением (6) можно воспользоваться и для определения числа ν, а следовательно, N, когда нам известны только относительные отклонения ε. Например, берем для каждого из m последовательных эквивалентных дней игры итоговую сумму, выигранную игроком, не вычитая из нее проигрышей. Каково число игр, сыгранных каждый день, и какова ставка? Если мы знаем, какова сумма ежедневных выигрышей, следовательно, мы должны знать и об относительных отклонениях, а этого вполне достаточно для определения количества сыгранных партий при помощи формулы (6); последняя дает количественное выражение того, что относительное отклонение между ежедневными выигрышами бывает тем меньше, чем больше количество сыгранных каждый день партий.

Этот вопрос подобен тем, которые ставятся в физике, когда хотят определить число молекул и молекулярные величины посредством наблюдения относительных отклонений в измеряемых величинах, измеряя флюктуации или их следствия.

Радиоактивные флюктуации и флюктуации концентраций. Прежде всего приведем несколько примеров из вопросов физики, где предшествующие результаты находят непосредственное приложение.

Возьмем радиоактивное вещество с большим периодом распада (для того, чтобы можно было принять его активность за

постоянную в продолжение всего времени наших опытов) и сосчитаем те испускаемые им α-частицы, которые попадают на экран или проходят через счетный прибор через равные последовательные промежутки времени. Наши основные постулаты, соответствующие предыдущим, будут состоять в том, что обстоятельства, зависящие как от внутренних, так и от внешних условий радиоактивного атома, обуславливающие возможность появления α-частицы, могут проявиться в любой момент, т. е. в любой из моментов интервалов, равных по времени. Кроме того, между группами обстоятельств, которые соответствуют двум различным частицам, нет никакой зависимости; обстоятельства, вызывающие взрыв атома в условиях, благоприятных для появления какой-либо частицы, не оказывают никакого влияния на условия, которые вызывают или сопровождают взрыв другого атома. Узаконение этих постулатов путем проверки их следствий имеет очень важное значение для теории радиоактивных явлений.

Первый постулат, касающийся внутренних состояний атома, обуславливающих его взрыв, означает, что эти обстоятельства могут проявляться в любой момент, что шансы продолжения жизни данного атома не зависят от времени, в продолжение которого он уже жил; другими словами, он стареет и гибнет только в результате происшествий, зависящих от внутренних случайностей его жизни. Я говорю «внутренних» потому, что, повидимому, никакие обстоятельства внешнего порядка, по крайней мере среди тех обстоятельств, которые мы можем изменить, не влияют на скорость превращения радиоактивных веществ.

Если наши постулаты точны и если мы получим всего N α-частиц в течение m равных промежутков времени, то вероятность появления n частиц в продолжение одного из этих интервалов может быть получена из формулы (1), и отклонения от средней величины $\frac{N}{m}=\nu$ должны удовлетворять соотношению (6). Этот результат был точно проверен в опытах Резерфорда.

Дальше мы встретимся с другой проверкой такого же типа, но имеющей большее значение с точки зрения счета частиц.

Пятнадцать лет назад Смолуховский предсказал также и самопроизвольные флюктуации, проявляющиеся при распределении молекул газа в различных частях занимаемого им объема, — флюктуации концентрации. Чтобы полученные результаты применить к этой проблеме, необходимо исходить из следующих постулатов.

Присутствие отдельной молекулы одинаково возможно во всех частях объема. Это и приводит нас к замене m интервалов m частями равного объема, из которых каждый содержит в среднем по ν молекул. Кроме того, следует допустить, что при-

сутствие какой-нибудь молекулы в одной из этих частей никак не влияет на возможное присутствие другой. Это позволяет нам пренебречь взаимодействием данных молекул или объемом каждой из них по отношению к общему объему. Предполагается поэтому, что газ должен быть достаточно разреженным.

Если жидкость плотная, то флюктуации распределения могут весьма отличаться от предполагаемых: они будут или значительно меньше, если молекулы столь сжаты, что занимают бо̀льшую часть всего данного объема, благодаря чему имеют место взаимоотталкивающие действия; или значительно больше, если между ними превалируют действия притяжения, как это происходит с жидкостями, близкими к критическому состоянию.

В отношении газа с малой плотностью, подобного воздуху, формулы (1), (2), (3) применяются для вероятности, что одна часть объема содержит n молекул, если m равных частей содержат всего их N.

Таким образом, чем меньше будет среднее количество молекул, тем более неизбежны флюктуации распределения. Мы встретим применение этих результатов в теории синего цвета неба.

Сведберг думал, что ему удастся обнаружить самопроизвольные флюктуации концентраций, которые должны происходить указанным образом в разбавленном растворе, наблюдая флюктуации числа α-частиц, испускаемых радиоактивным раствором, когда опыт поставлен так, что на экране получаются частицы, излучаемые только небольшой частью общего объема раствора. Он полагал, что случайности распределения радиоактивных атомов в объеме, соединенные с внутренними случайностями, определяющими взрыв, позволят наблюдать более значительные флюктуации, чем при наличии твердого радиоактивного вещества. Он действительно получил для того же среднего числа частиц в каждом интервале времени средний квадрат относительных отклонений, примерно вдвое больший по сравнению с тем, который предусматривает формула (5).

Общее рассуждение, посредством которого мы получили эту формулу, показывает, что если действительно (согласно второму постулату) имеется независимость между всеми обстоятельствами, определяющими появление на экране двух α-частиц, то результат Сведберга не может быть точным.

Рассуждая о группах обстоятельств, обуславливающих удар α-частиц об экран — как мы это делали в отношении комплекса условий, определяющих выход «черного» в рулетке, — можно заметить, что формула, выражая среднее относительное отклонение в зависимости от среднего числа выпадений, остается в силе при условии допущения постулатов безразличия и независимости.

Наложение случайностей распределения радиоактивных атомов в жидкости на случайности внутреннего порядка, вызываю-

щие взрыв, просто увеличивает сложность благоприятствующих обстоятельств, сложность, которая не предусмотрена в формуле.

Если новые опыты подтвердят наблюдения, сделанные Сведбергом, это докажет или то, что взрыв какого-то одного атома может влиять на взрыв соседнего атома (а это противоречит тому факту, что общая радиоактивность вещества до сего времени совершенно не зависела от концентрации), или то, что присутствие в каком-то участке радиоактивного атома вовлекает в этот же участок и другие радиоактивные атомы. Иными словами, оказывается, что растворенные атомы собираются в тесные группы, т. е. раствор Сведберга был коллоидальным. Во всяком случае, его результат, если он верен, не имеет ничего общего с самопроизвольными флюктуациями концентраций, о которых речь шла выше.

Молекулярные размеры. Рассмотрим теперь несколько примеров применения формулы (6) для определения молекулярных размеров посредством наблюдений флюктуаций, к которым можно применить эту формулу, как флюктуаций радиоактивных излучений или концентраций в разбавленных средах, т. е. случаи, когда приложимы постулаты безразличия и независимости.

Еще до того, как научились производить счет α-частиц по методу сцинтилляций или способом Резерфорда, Швейдлер заметил, что ток ионизации, образованный α-лучами, был подвержен сильным флюктуациям. Так как в равные между собой промежутки времени количества электричества, проходящие через электрометр в ионизационной камере, пропорциональны числам α-частиц, испускаемых во время этих интервалов, то тем самым становятся известными относительные отклонения между числами α-частиц и их средней величиной. Отсюда вытекает возможность вычислить эту среднюю величину, исходя из относительных отклонений, наблюдаемых на электрометре, если применить соотношение (6).

Прибегая к более сложным рассуждениям, можно понять, каким образом диффузное рассеивание света в атмосфере вызывается флюктуациями концентраций воздуха, предусмотренных Смолуховским, и как интенсивность блеска неба дает нам возможность вычислить молекулярные размеры.

Благодаря этим флюктуациям, — непрерывным колебаниям атмосферы вокруг равномерного распределения своих молекул в некотором объеме, — воздух является, с точки зрения оптики, мутной средой и рассеивает солнечный свет. Из значения флюктуаций, управляемых законами вероятности, можно вывести пропорцию рассеянного света на каждую длину волны и как следствие — отношение блеска неба к блеску Солнца. Кроме того, нетрудно понять, что эта пропорция увеличивается по мере того, как длина волны уменьшается, и поэтому небо кажется нам

синим. Действительно, для света, имеющего определенную длину волны, количество рассеянной энергии определяется степенью разнородности среды в масштабе длины волны, т. е. в соответствии с относительными флюктуациями концентрации в кубе, стороной которого является длина волны. Так как среднее число ν молекул, находящихся в этом кубе, пропорционально кубу длины волны, то очевидно, что среда будет там тем более мутной и рассеивающей, чем короче волна.

В противоположность этому, экспериментальное сравнение блеска неба с блеском Солнца для любой длины волны определит относительное значение флюктуаций в кубе со стороной, равной длине волны. Применение формулы (6) дает возможность вычислить среднее число молекул, находящихся в таком объеме.

При плотной среде существенную роль играют взаимные действия, меняющие относительное значение флюктуаций. Чтобы решить эту задачу в общем виде, нам придется обратиться к статистической механике, анализируя при этом новые задачи теории вероятностей с двух точек зрения: самого вероятного распределения и самопроизвольных флюктуаций вокруг него.

ПРОБЛЕМА ВТОРАЯ

Задача о сериях выходов. Один из вопросов, наиболее интересующих игроков, — это вопрос о распределении выходов одного цвета по сериям. Мы увидим, что эта проблема тесно связана с проблемой статистической механики, с самыми важными применениями исчисления вероятностей к физике.

Допустим, что на суммарное число $N + R$ игр рулетки «черное» вышло N, а «красное» — R раз; какова будет вероятность, например, для «красных» выходов, что они будут распределены в серии так, чтобы было n_1 отдельных «красных» выходов, n_2 из двух последовательных «красных» выходов, n_3 из трех выходов и т. д.

Так как суммарное число «красных» R, то мы будем иметь:

$$n_1 + 2n_2 + 3n_3 + \ldots = R. \tag{8}$$

Каждый ряд «красных» помещается в одном из интервалов между двумя последовательными «черными» или у каждого из двух концов всего ряда выходов; так что, если мы обозначим через n_0 и назовем числом «красных» серий порядка 0 число интервалов между «черными», где отсутствует «красное», мы должны получить $n_0 + n_1 + n_2 + \ldots$, равное $N + 1$; откуда:

$$n_0 + n_1 + n_2 + \ldots = N + 1. \tag{9}$$

Постулат независимости одного выхода от другого дает нам возможность утверждать, что каждый интервал между двумя «черными» может безразлично включать серии порядка 0, 1, 2, 3, ..., так как цвет данного выхода совсем не зависит от цвета предшествовавшего.

Таким образом, способов реализации данного распределения «красных» в $N+1$ серий будет столько же, сколько имеется различных способов для установления этих серий: для распределения между ними n_0 индексов — 0, n_1 индексов — 1, n_2 индексов — 2 и так далее, где индекс данной серии указывает порядок, к которому она принадлежит. Это, как указывалось выше, есть число полных перестановок данных $N+1$ серий:

$$W = \frac{(N+1)!}{(n_0)!\,(n_1)!\ldots}\,. \tag{10}$$

Вероятность данного распределения пропорциональна этому числу благоприятных случаев, т. е. числу способов, которыми его можно реализовать. Однако, в противоположность тому, что имело место в предыдущей задаче, числа n не только подчиняются условию иметь сумму, равную здесь $N+1$, но должны еще удовлетворять отношению (8); последнее определяет теперь число возможных случаев. В предыдущей задаче это число определялось условием, которое здесь отсутствует, а именно, чтобы было m различных индексов.

Простое рассуждение показывает, что это полное число возможных случаев равняется числу всех перестановок, которые можно образовать с помощью N «черных» и R «красных», т. е.

$$\frac{(N+R)!}{N!\,R!}\,; \tag{11}$$

разделив (10) на (11), получим искомое выражение для вероятностей.

Наиболее вероятное распределение. В предыдущей задаче максимальная вероятность соответствовала равномерному распределению. Вследствие условия, установленного отношением (8), самое вероятное распределение $N+1$ серий между различными порядками не будет однородным. Чтобы его получить, приходится искать значения для n_0, n_1, n_2, которые удовлетворяли бы одновременно отношениям (8) и (9) и обеспечивали наибольшую возможную величину выражению (10) для W.

Вопрос этот может быть разрешен самым простым путем, если предположить, что числа n достаточно велики для того, чтобы каждый множитель мог быть заменен формулой Стирлинга:

$$n! = \sqrt{2\pi n}\,\left(\frac{n}{e}\right)^n.$$

Взяв логарифм от W и откинув величины, которыми можно пренебречь (при гипотезе, что n — большие числа, поскольку логарифмом большого числа можно пренебречь по сравнению с самим числом), мы получим:

$$\log W = C - (n_0 \log n_0 + n_1 \log n_1 + \ldots) = C - \\ - \sum n \log n, \qquad (12)$$

где C — константа, имеющая одинаковую величину для всех распределений, вероятности которых сравнивают. Так как n и, следовательно, N очень велики, мы можем пренебречь единицей в условии (9) и искать максимум для (12) при условии (8) и (9).

Непосредственно находим, что этот максимум соответствует распределению, представленному законом:

$$n_i = \frac{N^2}{R+N}\left(\frac{R}{R+N}\right)^i, \qquad (13)$$

причем i могут принимать целые значения 0, 1, 2,... .

Очевидно, что самое вероятное распределение «красных» по сериям соответствует числам серий, изменяющихся, согласно убывающей геометрической прогрессии со знаменателем $\frac{R}{R+N}$, по мере того как порядок серии i увеличивается. Каково бы ни было среднее число $\frac{R}{N}$ выпадений в сериях, все же маленькие серии будут более частыми, причем уменьшение частоты с порядком i происходит тем медленнее, чем больше средний порядок серии $\frac{R}{N}$, так как знаменатель прогрессии стремится к единице, когда увеличивается $\frac{R}{N}$.

Если игра в рулетку такова, что на большое число ударов получится одинаковое число «красных» и «черных», то знаменатель прогрессии будет равен $\frac{1}{2}$. При $R = N$ получим:

$$n_0 = \frac{N}{2}, \quad n_1 = \frac{N}{4}, \quad n_2 = \frac{N}{8}, \ldots, \quad n_i = \frac{N}{\cdot 2_i}.$$

Итак, вполне вероятно, что изолированные «красные» выходы будут вдвое чаще, нежели серии из двух выходов; серии из двух выходов в два раза чаще, чем серии из трех и т. д. Проверка этого результата может послужить средством, чтобы убедиться, что игра ведется честно и соответствует постулатам, которые мы допустили. Если игра комбинируется таким образом, что R отличается от N, и если, например, число «красных» кле-

ток отличается от числа «черных», то самое вероятное распределение серий произойдет в соответствии с отношением $\frac{R}{R+N}$, которое будет отличаться от $^1/_2$.

Если бы мы решили найти самое вероятное распределение серий между всеми возможными значениями, а не вероятность какого-нибудь распределения, необходимого для изучения флюктуаций вокруг самого вероятного, то мы скорее бы приблизились к цели, рассуждая следующим образом.

Каждый раз, когда сделан новый ход, шансы выхода «красного» и «черного» относятся между собой, как R относится к N. Раз начатая серия продолжается, если выходит «красный», и прекращается, если выходит «черный».

Шансы, что какая-нибудь серия продолжится, относятся к шансам, что она прекратится, как R относится к N.

Это выражается уравнением, действительным, каково бы ни было l в самом вероятном распределении серий:

$$\frac{n_l}{n_{l+1}+n_{l+2}+\ldots}=\frac{N}{R},$$

или

$$\frac{n_l}{n_l+n_{l+1}+\ldots}=\frac{N}{R+N};$$

и так как $\frac{n_{l-1}}{n_l+n_{l+1}}=\frac{N}{R}$, мы получаем путем деления

$$\frac{n_l}{n_{l-1}}=\frac{R}{R+N},$$

откуда выводится отношение (13), если примем в расчет (9).

Непрерывные и прерывные вероятности. Нашим результатам можно придать другую форму, которая даст возможность перейти к предельному случаю непрерывных вероятностей.

Представим, что удары рулетки были сыграны равномерно во времени; в таком случае интервал времени между двумя последовательными ударами был бы постоянным и равным ε. Продолжительность одной серии порядка l будет $t=l\varepsilon$, а общая продолжительность наших серий оказывается равной $R\varepsilon$; другими словами, средняя продолжительность серии будет:

$$\bar{t}=\frac{R}{N}\varepsilon.$$

Так как каждая серия может содержать только целое число l выходов, то её продолжительность $\bar{t}$ может быть только целым кратным ε. Здесь мы имеем случай задачи прерывных вероятностей с конечной элементарной областью вероятностей ε.

Отношение (13) также может быть выражено как

$$n_i = \frac{N^2}{R+N} e^{-\frac{t}{\tau}} = Ce^{-\frac{t}{\tau}}, \qquad (14)$$

полагая, что

$$e^{-\frac{\varepsilon}{\tau}} = \frac{R}{R+N} = \frac{\bar{t}}{\bar{t}+\varepsilon} \dots \qquad (15)$$

Необходимо отметить, что если наносить по абсциссе значения i, а по ординате величины n, то полученные точки при самом вероятном распределении будут находиться на показательной кривой, уравнение которой представлено (14). Величина модуля τ определяется отношением (15). Мы увидим, далее, что в данном вопросе этот модуль играет ту же роль, что и температура, в самых вероятных распределениях, которые предусматривает статистическая механика; его можно назвать температурой нашего вероятного распределения серий. Это станет ясным при более близком рассмотрении отношения между модулем τ и средней продолжительностью серий. Действительно, отношение (15), решая его по отношению к t, можно определить следующим образом:

$$\bar{t} = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{\varepsilon}{\tau}} - 1}. \qquad (16)$$

Это соотношение представлено кривой I (рис. 9), выходящей из начала координат с горизонтальной касательной и поднимающейся затем, стремясь к асимптоте $t = \tau - \frac{\varepsilon}{2}$.

Кривая I весьма сходна с кривой, изображающей, в зависимости от температуры, изменение количества тепла, необходимого, чтобы довести твердое тело от абсолютного нуля до температуры T — такой, какой она получается в результате экспериментов Нернста и его помощников. Вместо полного количества тепла, столь же успешно можно рассматривать среднюю величину энергии ε молекулы как функцию температуры (кривая II, рис. 9).

Количественно еще более точно представляется тождественность нашей кривой с кривой, изображающей распределение энергии «черного» излучения в зависимости от длины волны и температуры. Известно, что энергия, содержащаяся в единице объема какой-нибудь полости при тепловом равновесии, изображается, — согласно законам Больтцмана и Вина, для части, заключенной между длиной волны λ и $\lambda + d\lambda$, — через

$$\frac{1}{\lambda^5} F(\lambda T) d\lambda.$$

Самые точные измерения, произведенные в рассматриваемом интервале длины волны, относительно функции F приводят к следующей форме:

$$F(\lambda T) = \frac{C}{e^{\frac{c}{\lambda T}} - 1},$$

причем C и c — величины постоянные. Если мы нанесем на абсциссы переменную величину λT и на ординаты — функцию

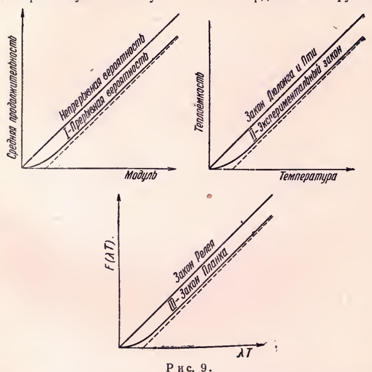

Рис. 9.

$F(\lambda T)$, какую дает нам опыт, то получим кривую, которая при соответственном подборе шкалы точно совпадает с нашей кривой (кривая *III*, рис. 9).

Аналогия становится еще более разительной, когда переходят к предельному случаю непрерывных вероятностей.

Если предположить, что удары рулетки ускоряются все больше и больше, сменяясь все уменьшающимися интервалами ε, то серии наблюдаемой продолжительности будут содержать очень большое число ударов и будут иметь место только в том случае, если R будет очень велико по отношению к N, т. е. $\bar{t}$ и, следовательно, τ по сравнению с ε. Наша задача сводится

к задаче самого вероятного распределения интервалов времени t между последовательными событиями N («черные» выходы), образующимися случайно, причем величина среднего промежутка между ними задана.

Если в формуле (16) ε будет стремиться к 0, то получаем $\bar{t}=\tau$, и (14) становится

$$dn=\frac{N}{\tau}e^{-\frac{t}{\tau}}dt, \tag{17}$$

причем dn — число интервалов, длина которых заключена между t и $t+dt$.

Таким образом, показательный закон существует и в случаях непрерывных вероятностей; самые короткие интервалы всегда бывают самыми частыми, но мы имеем дело с той особенностью, что средняя продолжительность становится равной модулю и что кривая I заменяется прямой $\bar{t}=\tau$, параллельной предыдущей асимптоте.

Как будет показано ниже, применение непрерывных вероятностей к термодинамике позволяет предвидеть, в соответствии с законом Дюлонга и Пти для средней энергии молекулы твердого тела, величину, пропорциональную температуре и представленную прямой, аналогичной предыдущей, параллельной асимптоте экспериментальной кривой.

Точно так же применение непрерывных вероятностей к теории лучеиспускания приводит к закону Рэлея, согласно которому функция $F(\lambda T)$ пропорциональна λT. Опыт подтверждает этот закон для больших величин λT, т. е. что прямая, проходя через начало, как это предусматривает непрерывная вероятность, остается еще параллельной асимптоте экспериментальной кривой.

Напрашивается заключение, необходимость которого блестяще доказал Планк, создав свою теорию квантов. Оно сводится к следующему: мы можем представить факты, относящиеся к черному излучению или к удельной теплоемкости твердых тел, только вводя понятие прерывности в применение вероятностей в физике и принимая во внимание конечное протяжение, которое должны иметь элементарные области вероятности. Это заключение подтвердилось многими другими фактами. Ниже мы покажем, каковы должны быть природа и величина этих элементарных областей.

Распределение свободных пробегов. Применим к физике закон распределения (17), относящийся к непрерывным вероятностям. Этот закон можно было бы вывести и более простым способом, если не связывать его с более общим законом прерывных вероятностей.

Если $N+1$ точек распределяются случайно на некоторой прямой при условии, что их интервал будет равен λ, то число интервалов между двумя последовательными точками, длина которых заключена между l и $l+dl$, должно быть при самом вероятном распределении дано формулой (17):

$$dn = \frac{N}{\lambda} e^{-\frac{l}{\lambda}} dl.$$

Случайность соответствует здесь постулату, что любая точка может безразлично находиться в любом из равных интервалов, как бы малы они ни были, на которые можно разложить прямую, и что положение различных точек будет считаться абсолютно независимым одно от другого.

От этого самого вероятного распределения могут возникнуть отклонения, но их относительная роль будет уменьшаться по мере того, как число рассматриваемых точек будет увеличиваться.

Та же формула (17) дает нам распределение свободных пробегов газовой молекулы между различными возможными величинами l, когда средняя длина свободного пробега равна λ. Постулаты, обуславливающие возможность ее применения, таковы: каждый удар об отдельную молекулу может произойти безразлично в любой точке всего пути, и данный удар ничем не оказывает влияния на время, которое может пройти, прежде чем произойдет второй удар.

Интервалы между излучениями α-частиц. Важное применение этой формулы относится к распределению интервалов времени между радиоактивными излучениями, когда средний интервал равняется τ, т. е. когда $N+1$ испускания распределяются на некоторое данное времени $N\tau$.

Самый простой способ проверки правильности закона заключается в регистрации при помощи электрометра — как это делала Кюри — появления отдельных частиц на фотографической пленке, развертывающейся с постоянной скоростью. Сосчитывают число интервалов серии, длина которых превышает l. Если формула точна, т. е. если радиоактивный взрыв определяется только внешней или внутренней случайностью, то для числа интервалов мы должны получить:

$$N_l = \frac{N}{\lambda} \int_l^\infty e^{-\frac{l}{\lambda}} d\lambda = N_l^{\;-\frac{l}{\lambda}}$$

при самом вероятном распределении. Опыт показывает, что точно так же бывает и с отклонениями, которые в среднем **не**

превышают того, что́ можно вычислить по теории вероятности. Если мы нанесем l по абсциссе, а логарифмы N_l по ординате, то полученные точки располагаются на прямой, наклон которой определяет λ, а ординату начала — логарифм N (рис. 10). Ниже прямой оказываются иногда только те точки, которые относятся к очень малым величинам l. Это объясняется тем, что последовательные испускания становятся неразличаемыми, когда интервалы слишком малы; так что в действительности количество

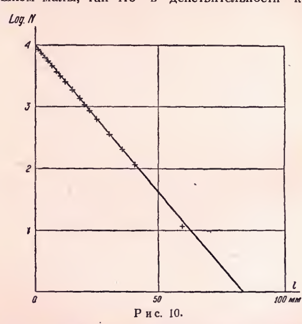

Рис. 10.

испускаемых частиц бывает несколько больше, чем их насчитывает прибор. Эту ошибку можно исправить и точно определить общее число испускаемых частиц, пользуясь предыдущим законом, так как ордината начала должна дать точную величину логарифма N.

Таким образом, весьма важный, замечательный закон внутренней случайности, обуславливающий радиоактивные взрывы, можно проверить и, следовательно, внести бо̀льшую точность относительно α-частиц; с помощью этого закона легко и точно можно определить молекулярные константы.

Серия, представленная на рис. 7, включала 100 000 интервалов.

Закон радиоактивных превращений. В действительности радиоактивные вещества, которые считались постоянными (в применениях, рассмотренных нами выше), разрушаются вследствие

атомных взрывов. Их активность со временем уменьшается, следуя экспоненциальному закону, представляющему собой закон химических мономолекулярных реакций.

Если в начале данного промежутка времени имеется N радиоактивных атомов, то число тех, которые разрушаются между моментами t и $t+dt$, можно выразить формулой:

$$dN = \frac{N}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} dt,$$

причем τ является *периодом превращения или средней продолжительностью* «жизни» атома; т. е. вследствие особой формы закона средняя продолжительность «жизни» атома вычисляется с какого-то последующего момента, а не с момента его появления от «производящего» атома. Этот факт, кажущийся парадоксальным, основан на вмешательстве случая. Предполагается, что вероятная продолжительность «жизни» атома в будущем не зависит от времени, в течение которого он существовал. Соответствие экспериментального закона с формулой (17) показывает, что уничтожение данного числа радиоактивных атомов происходит согласно закону *наибольшей вероятности, совместимому с данной средней продолжительностью существования атома.*

Формула барометрического уровня. Возьмем цилиндрический столб газа, температура которого T пусть будет равномерной. Если не будет никакого условия, препятствующего распределению газа в данном объеме, то распределение, которое установится, будет самым вероятным в смысле нашей первой задачи: оно будет равномерно за исключением тех флюктуаций, о которых мы упоминали и которые заметны в очень малых участках всего объема благодаря огромному числу молекул. Плотность газа будет повсюду одинакова и не будет зависеть от высоты z над основанием.

Но если газ тяжел, то, как мы знаем, плотность будет изменяться в зависимости от высоты, следуя весьма известному закону, который выводится следующим образом: если p — давление в некоторой точке, где концентрация равна c в грамм-молекулах на единицу объема, то

$$p = RTc,$$

где R — постоянная идеальных газов. Если M — грамм-молекулярная масса, то плотность рассматриваемой точки равна Mc, а основной закон статики жидкости дает:

$$dp = -Mcg\,dz;$$

отсюда

$$c = c_0 e^{-\frac{Mgz}{RT}}.$$

Если N — число Авогадро, число молекул в грамм-молекуле, а m — масса одной молекулы, то, полагая, что

$$k = \frac{R}{N},$$

предыдущее отношение можно написать:

$$c = c_0 e^{-\frac{mgz}{kT}}, \tag{18}$$

причем c_0 есть концентрация для высоты, равной нулю. Число dn молекул, заключенных в среднем между высотами z и $z + dz$, будет:

$$dn = Ce^{-\frac{mgz}{kT}} dz.$$

Аналогия этого закона с нашей формулой (17) показывает, что распределение, устанавливающееся в газе под действием силы тяжести, *будет наиболее вероятным из тех, которые могут быть совместимы с данной средней высотой* $\bar{z} = \frac{kT}{mg}$ (если высота столба ограничена), т. е. с данной высотой центра тяжести, если мы постулируем, что присутствие молекулы одинаково возможно в слоях равной толщины и что наличие молекулы на известной высоте не оказывает никакого влияния на возможность присутствия других молекул, что связано с предположением о достаточно разреженном газе. Это предположение мы уже сделали для применения закона идеальных газов. Так как mgz есть потенциальная энергия ψ молекулы, находящейся на высоте z, то формула принимает вид:

$$dn = Ce^{-\frac{\psi}{kT}} dz. \tag{18'}$$

Для частного случая распределения тяжелого газа опыт показывает, что по высоте газ распределяется самопроизвольно *наиболее вероятным образом, который только может быть совместим с данной потенциальной энергией.*

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Закон Больтцмана. Основная заслуга Больтцмана в том, что он наиболее совершенным образом обобщил предыдущий результат и показал, что форма равновесия, предусматриваемая термодинамикой для какой-нибудь материальной системы, всегда *наиболее вероятна из тех, которые можно совместить с ее полной энергией, потенциальной и кинетической.*

Чтобы уточнить смысл сказанного, следует точно установить, каковы основные постулаты для определения вероятности. Мы достигаем этого благодаря понятию о фазовом пространстве, которое ввели Больтцман и Гиббс и которое лежит в основе статистической механики. Конфигурация и положение материальной системы, которая, впрочем, может содержать только одну молекулу, определяются некоторыми координатами $q_1, q_2, \ldots, q_r$ в количестве, равном количеству степеней свободы системы, а ее состояние движения — соответствующими моментами или количеством движения $p_1, p_2, \ldots, p_r$. Считая координаты и моменты как бы определяющими положение точки в пространстве $2r$ измерений или фазовом пространстве, можно представить каждую динамическую конфигурацию такой системы в виде точки такого пространства, а ее изменения с течением времени — линией или траекторией. При этом через каждую точку проходит только одна траектория. Различные конфигурации этой системы соответствуют различным точкам фазового пространства так же, как различные положения центра молекулы в сосуде соответствовали различным точкам внутреннего объема этого сосуда. Чтобы определить вероятности в случае распределения в объеме, мы предположили эквивалентными участки, занимающие равные части всего объема.

Аналогично этому, мы можем также разделить наше обобщенное пространство на элементы с одинаковым протяжением $d\omega$. Основная теорема Лиувилля показывает, что если наша система подчиняется уравнениям, аналогичным уравнениям динамики и сводимым к форме уравнений Гамильтона, то элементы одинаковой протяженности, подобные вышеупомянутым элементам, равным по объему, должны рассматриваться как эквивалентные с точки зрения теории вероятностей, т. е. возможности присутствия внутри их точки, представляющей конфигурацию нашей системы.

Действительно, теорема Лиувилля заключается в следующем: если мы проследим во времени за системами, изображающие точки которых располагаются первоначально в данном элементе фазового пространства, то увидим, что участок перемещается, деформируется в общем пространстве, сохраняя в то же время свою постоянную протяженность.

Значит, первоначальное присутствие изображающей точки на некотором участке в той же мере вероятно, как и ее будущее присутствие на участке одинаковой протяженности. Два элемента одинакового размера следует считать эквивалентными с точки зрения возможного присутствия изображающей точки на том же основании, как и два элемента одинакового объема с точки зрения возможности присутствия в них молекул. Это и будет нашим основным постулатом в определении вероятности, и, как

всегда, он найдет свое полное оправдание в согласованности выводов с фактами.

Рассмотрим некоторую совокупность, составленную из большого числа N систем, тождественных предыдущим, так же, как газ состоит из большого числа одинаковых молекул.

Каждому динамическому состоянию совокупности и каждому распределению N систем, которые образуют эту совокупность среди возможных конфигураций, соответствует распределение N изображающих точек в фазовом пространстве. Чтобы вычислить вероятность этого распределения, разделим фазовое пространство на эквивалентные участки $\Delta\omega$ одинаковой протяженности, которые, как мы полагаем, могут безгранично уменьшаться при гипотезе непрерывных вероятностей. Если Δn_1, Δn_2, ... представляют собой числа изображающих точек, находящихся в элементах для предполагаемого распределения, и если, кроме того, установлен постулат — аналогичный постулату для разреженного газа — о взаимной независимости расположения различных точек, то для W способов, посредством которых можно осуществить рассматриваемое распределение, мы получим следующее выражение, пропорциональное вероятности распределения:

$$W = \frac{N!}{(\Delta n_1)!\,(\Delta n_2)!\ldots}. \tag{19}$$

И если, как мы предполагаем, имеется известная полная энергия U этого комплекса — сумма индивидуальных энергий E, величина которых определяется для каждой системы изображающей точкой ее конфигурации, то это значит, что возможные распределения подчиняются условию, аналогичному с (8).

$$E_1\Delta n_1 + E_2\Delta n_2 + \ldots = U, \tag{20}$$

причем E_1, E_2,... будут энергиями, которые соответствуют расположению изображающих точек на различных участках, эквивалентных по протяженности. Распределение максимальной вероятности будет представлено, согласно вычислению, подобному тому, которое нам дало отношение (14), через

$$\Delta n = Ce^{-\frac{E}{\theta}}\Delta\omega.$$

Плотность фазы $\rho = \frac{\Delta n}{\Delta\omega}$, соответствующая самому вероятному распределению наших N систем, дается посредством закона *канонических множеств* Гиббса

$$\rho = Ce^{-\frac{E}{\theta}}. \tag{21}$$

Модуль θ распределения и коэфнцнент C определяются как эквивалентные (8) н (9), и я выражаю их в дифференцнальной форме для того, чтобы подойти к предельному случаю непрерывных вероятностей:

$$C\int Ee^{-\frac{E}{\theta}}d\omega=U \quad \text{и} \quad C\int e^{-\frac{E}{\theta}}d\omega=N. \qquad (22)$$

Ниже мы покажем, что это самое вероятное распределение, соответствующее условиям, в которые поставлен наш комплекс из N снстем, есть именно то, которое соответствует форме равновесия, предусмотренной термоднпамикой. В то же время со статистической точкн зрения выясняется глубокое значенне основных понятий термоднпамнки: подобно тому, как общая энергия U представляет собой внутреннюю энергню нашего комплекса из N систем (например, из N молекул), нам придется счнтать абсолютную температуру пропорцнональной модулю θ распределения. Энтропия н полезная энергня будут соответственно пропорциональны логарифмам вероятности W и константы C.

Случай весомого газа. Применим сначала наш основной закон самого вероятного распределення к случаю весомого газа, состоящего из тождественных молекул, имеющнх массу m. Каждая молекула будет представлять собой одну из наших систем, а газ в целом — комплекс, распределенне которого мы нщем. Кроме того, предположим, что речь ндет об одноатомном газе, в который нам не надо будет вводить вращений молекул; каждая из них будет уподоблена некоторой матернальной точке только с тремя степенями «свободы», которым соответствуют координаты x, y, z н составляющне u, v, w скоростн.

Энергия E снстемы, т. е. сумма кннетнческой энергни и потенциальной энергии тяготення молекулы, выражается формулой:

$$E=\frac{1}{2}\,m(u^2+v^2+w^2)+mgz.$$

Обобщенное илн фазовое пространство имеет здесь шесть измерений — три для коордннат x, y, z и трн для соответствующих моментов или количеств движення mu, mv, mw; так что каждое возможное состоянне молекулы, как ее положенне, так н двнжение, представлены отдельной точкой в этом обобщенном пространстве, элемент которого $d\omega$ имеет величнну:

$$d\omega=m^3dx\,dy\,dz\,du\,dv\,dw.$$

Распределение точек, изображающих в какой-то момент этого пространства состоянне молекул целого, дает нам одновременно размещение этнх молекул между различными положе-

ниями и всевозможными скоростями. В самом вероятном распределении, совместимом с некоторой данной полной энергией, плотность этих точек выражается формулой:

$$\rho = Ce^{-\frac{m}{2\theta}(u^2+v^2+w^2)-\frac{mgz}{\theta}}. \tag{23}$$

В отношении скорости — это закон распределения Максвелла. Из данной формулы можно непосредственно вывести, что кинетическая энергия, соответствуя какой-либо степени свободы, например $\frac{1}{2}mu^2$, имеет в качестве средней величины $\frac{\theta}{2}$, независимо от того, какова эта степень свободы. Было бы то же самое, если бы мы предположили, что молекула может вращаться и изменять форму. Если мы выразим кинетическую энергию в виде суммы квадратов, из которых каждый соответствует некоторой степени свободы, то средняя величина в самом вероятном распределении будет одна и та же для каждого из членов этой величины, и ее значение будет $\frac{\theta}{2}$. Это — хорошо известная теорема равномерного распределения энергии по степеням свободы, которую легко применить к случаю смещения различных видов молекул, рассматривая вероятности, аналогичные предыдущим.

Следует заметить, что средняя кинетическая энергия для одной степени свободы будет той же величиной $\frac{\theta}{2}$, когда, вместо того чтобы делать вычисления для совокупности всех молекул, берут только молекулы, содержащиеся в участке объема обычного пространства dx, dy, dz или в отрезке dz цилиндра, в котором, по нашему предположению, заключен газ. Распределение скоростей между молекулами весового газа и, следовательно, средняя кинетическая энергия одинаковы на всяких высотах.

Согласно кинетической теории, давление газа пропорционально средней кинетической энергии его молекул. Если c — концентрация газа на высоте z в грамм-молекулах на единицу объема, а N — число Авогадро, то величина $\frac{\theta}{2}$ для средней энергии некоторой степени свободы приводит к выражению для давления

$$p = Nc\theta.$$

Сравнение с законом газов $p = RcT$ дает отношение:

$$\theta = \frac{R}{N}E = kT. \tag{24}$$

Значит, модуль θ самого вероятного распределения пропорционален абсолютной температуре и придает статистическое

значение понятию о температуре. Самое вероятное распределение газа, как и любого комплекса, — это изотермическое распределение.

Если мы отыскиваем изменения плотности газа с изменением высоты в распределении, данном формулой (23), принимая во внимание отношение (24), то после интегрирования $\rho d\omega$ по u, v, w в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ мы получим закон, представленный формулой (18), т. е. закон барометрического уровня. На этом частном примере можно проверить способ, которым мы определяли вероятность конфигурации нашей совокупности систем, исходя из предпосылок эквивалентности равных участков фазового пространства.

Энтропия и вероятность. Чтобы получить статистическое толкование принципа Карно, рассмотрим сначала случай обратимых превращений. Для осуществления такой трансформации мы видоизменяем — довольно медленно — условия, данные для нашего комплекса систем (величина полной энергии U, внешние силы, действующие на каждую систему); тогда наш комплекс в каждый данный момент может принять то наиболее вероятное распределение, которое совместимо с существующими условиями. Итак, в каждый данный момент мы будем иметь распределение по формуле (21), с постоянными C и θ, изменяющимися от одного момента до другого. Количество W, выраженное формулой (19) и названное нами *вероятностью,* будет иметь в каждый данный момент времени наибольшую величину, соответствующую поставленным условиям, и эта величина будет изменяться по мере превращения. Каким же образом? Так как фазовое пространство разделено на участки $\Delta\omega$ — равные между собой, хотя и очень малые, но все же довольно значительные для того, чтобы каждый из них мог включить большое число $\Delta n = \rho\Delta\omega$ изображающих точек, — то, применив формулу Стирлинга к каждому из множителей, входящих в выражение W, и сохранив лишь самые главные его члены, мы можем написать:

$$\log W = N(\log N - \log \Delta\omega) - \sum \rho \log \rho \, \Delta\omega.$$

Первое выражение постоянно во время всей трансформации, второе изменяется по мере распределения. Заменив интегралом сумму, фигурирующую в нашем выражении и охватывающую все участки фазового пространства, мы получим (обозначая первый член постоянной буквой A):

$$\log W = A - \int \rho \log \rho \, d\omega.$$

Допуская, что в каждый данный момент осуществляется самое вероятное распределение, мы можем заменить ρ выраже-

нием (21), и тогда получим, принимая в расчет условия (22):

$$\log W = A + \frac{U}{\theta} - N \log C. \qquad (25)$$

Дифференцируем последнее отношение:

$$d \log W = \frac{dU}{\theta} - \frac{U}{\theta^2} d\theta - N \frac{dC}{C}.$$

Дифференцируем также второе из условий (22); оно дает:

$$N \frac{dC}{C} + \frac{U}{\theta^2} d\theta - \frac{C}{\theta} \int e^{-\frac{E}{\theta}} dE \, d\omega = 0,$$

откуда выводим

$$d \log W = \frac{dU}{\theta} - \frac{\theta}{1} \int \rho \, d\omega \, dE.$$

Но интеграл

$$\int \rho \, d\omega \, dE$$

выражает нарастание потенциальной энергии комплекса в результате изменения внешних условий, т. е. выражает работу $d\tau$, доставленную комплексу во время обратимого превращения. Итак,

$$d \log W = \frac{dU - d\tau}{\theta}.$$

Разность $dU - d\tau$ между нарастанием внутренней энергии и совершаемой работой есть количество теплоты dQ, доставленное комплексу; принимая в расчет отношение (24), получаем:

$$\frac{dQ}{T} = k \, d \log W = d(k \log W).$$

Итак, для процесса трансформации, состоящей из непрерывного ряда состояний максимальной вероятности, частное от деления теплоты dQ на абсолютную температуру есть точный дифференциал.

Это одно из выражений принципа Карно, применяемое к обратимым превращениям. Таким путем мы показываем, что молекулярное распределение максимальной вероятности обладает всеми свойствами, которые в термодинамике приданы конфигурациям равновесия. Пользуясь динамическим определением вероятностей с помощью понятия фазового пространства, мы придаем точный смысл интуитивному понятию: самое вероятное молекулярное распределение, осуществляясь несравненно чаще, чем все другие, в силу сложности всего комплекса, должно представлять конфигурацию равновесия этого комплекса при данных условиях.

Из предыдущих результатов выводят также и статистическое значение энтропии:

$$dS = d(k \log W)$$

или, опуская константу,

$$S = k \log W. \qquad (26)$$

Энтропия, когда ее можно определить термодинамическим путем, т. е. в случае обратимых процессов, пропорциональна логарифму вероятности конфигурации равновесия, т. е. наиболее вероятной конфигурации, соответствующей условиям, предписанным рассматриваемому комплексу.

Вместе с тем мы получаем возможность обобщить количественное понятие энтропии и распространить ее на конфигурации, которые не могут быть составной частью обратимой трансформации. Так как посредством (19) можно определить вероятность W для любой конфигурации нашего комплекса, то, чтобы получить общее определение энтропии и постичь глубокий чисто статистический смысл этого понятия, вполне достаточно будет считать общим отношение (26).

Тот факт, что комплекс самопроизвольно стремится к наиболее вероятной конфигурации, соответствующей условиям, в которые он поставлен, обобщает и глубоко освещает теорему Клаузиуса, согласно которой энтропия стремится к максимуму при данной внутренней энергии.

Может быть, самым значительным следствием этого результата будет то, что конфигурация равновесия, предусмотренная термодинамикой, конфигурация максимальной энтропии, представляется нам самой вероятной, но не единственно возможной для комплекса. С течением времени комплекс принимает всевозможные конфигурации сообразно их вероятностям.

Наиболее вероятной конфигурацией будет та, которая чаще всего повторяется и преобладает тем больше, чем сложнее комплекс и чем больше число N составляющих его систем. Вокруг этой конфигурации должны происходить флюктуации. Ниже мы покажем, каким образом обобщенное отношение (26) дает возможность предугадать их значение во всех случаях и как непосредственное наблюдение этих флюктуаций сполна подтверждает вытекающие следствия с точки зрения статистики и приносит новые многочисленные способы для определения молекулярных размеров.

Следовательно, принцип Карно теряет свое абсолютное значение: конфигурации равновесия, которые этот принцип дает возможность предвидеть и которые он представляет вполне определенными, фактически соответствуют только среднему состоянию, вокруг которого материя находится в непрерывном колебании,

образуя тем относительно более значительные флюктуации, чем меньше число имеющихся молекул.

Принимая в расчет отношения (24) и (26) и выбирая надлежащим образом произвольную постоянную в выражении энтропии, мы сможем написать уравнение (25) в такой форме:

$$U - TS = N\theta \log C = RT \log C,$$

где R — газовая постоянная для числа N молекул, равного числу систем нашего комплекса. Таким образом, мы получаем выражение для полезной энергии и ее отношение к постоянной C, фигурирующей в законе наиболее вероятного распределения:

$$\psi = RT \log C.$$

Как температура, так и используемая энергия имеют значение лишь для распределения равновесия и максимума вероятности; эти понятия можно определить только на основе констант θ и C, характеризующих такое распределение. Энтропия, наоборот, поддается более общему определению, так как она связана с вероятностью W, уравнение которой (19) дает выражение для любой конфигурации комплекса. Это указывает на большое значение понятия энтропии, введенного задолго до того, как стали ясными его глубокие основания. Вполне очевидно, что если какая-нибудь сложная совокупность не находится в термодинамическом равновесии, если её температура, например, неравномерна, ее можно разложить на более простые комплексы, на элементы объема в обычном смысле слова, для каждого из которых равновесие почти установилось и для каждого из которых можно определить температуру и используемую энергию, вычислить в термодинамическом смысле энтропию из ее определения. Это замечание находит свое применение во многих рассуждениях, относящихся к флюктуациям.

Итак, мы получили статистическое объяснение термодинамики, следуя по пути, открытому Больтцманом. Можно, как поступил, например, Гиббс, стать на несколько иную точку зрения, но основа рассуждений от этого не изменится. Поэтому я и не настаиваю на необходимости различать оба эти способа. Метод Больтцмана мне кажется наиболее ясным и наиболее плодотворным.

Законы молекулярных действий. Мы только что рассмотрели в термодинамике общую картину результатов статистической механики, которая гораздо богаче и глубже, чем термодинамика, так как она дополняет ее принципы, раскрывая одновременно их истинный смысл. Она дает возможность не только предвидеть самопроизвольные флюктуации, которые абсолютно игнорируются термодинамикой или, вернее, возможность которых термодинамика отрицает, но и раскрыть свойства молекулярных

комплексов, в которых отражаются глубокие законы индивидуальных действий, оказываемых на молекулы или же молекулами друг на друга.

Я показывал вначале, что некоторые свойства комплексов независимы от этих индивидуальных законов и не содержат ничего, кроме подтверждения сложности целого и роли, которую играет вероятность. Законы, которые выводятся из применения принципа Карно, из термодинамики, принадлежат именно к данной категории. Эти законы выражают лишь то, что наблюдаемая обычно конфигурация равновесия является самой вероятной из всех тех, которые может принимать комплекс. Неточность наших методов наблюдения делает то, что эта вероятность постепенно переходит в уверенность — по мере того, как целое усложняется, или скорее потому, что наблюдаемые совокупности, как правило, бывают весьма сложные.

Эти свойства термодинамики, со своей стороны, не дают возможности добраться до индивидуальных законов, от которых они зависят.

Наоборот, закон самого вероятного распределения, который выражает формула (19), вводит эти индивидуальные законы посредством промежуточной энергии E, относящейся к каждой системе, и дает, таким образом, возможность получить — путем интегрирования — свойства равновесной конфигурации, доступные нашим измерениям законы, в которые входят законы молекулярных действий и наблюдение над которыми даст нам возможность изучить последние. Отсюда возникает новая область исследования, которую мы начинаем ценить только теперь.

Ориентация молекул. В качестве первого примера я возьму теорию ориентации молекул, значение которой показано мной в докладе о явлениях парамагнетизма и электрического и магнитного двойного преломления.

Когда под действием внешнего поля каждая молекула подчиняется паре сил, которая стремится ее ориентировать, то энергия E, относящаяся к молекуле, содержит выражение, представляющее собой работу, выполненную этой парой, а формула (21) определяет способ, посредством которого осуществляется ориентация молекул, способ, по которому они распределяются между возможными ориентировками в наиболее вероятной конфигурации целого. Эта формула выражает наложение действия беспорядочного теплового движения, стремящегося к изотропному распределению, и направляющего действие поля, стремящегося расположить параллельно все молекулы с ориентацией минимальной энергии. Поскольку, таким образом, нам известно равновесное распределение, то мы можем простым интегрированием получить измеримую величину — магнитный

момент, происходящий в случае парамагнетизма, или показатели преломления в случае, если имеется двойное преломление. Следовательно, можно будет перейти от наблюдения к молекулярному магнитному моменту или к оптической диссимметрии каждой молекулы.

Можно указать и на случай более сложного характера, когда направляющая пара, действующая на молекулу, не только зависит от внешнего поля и ориентации рассматриваемой молекулы по отношению к этому полю, как это бывает в случае разбавленных парамагнитных веществ, но получается в результате взаимных действий между молекулами. В выражении энергии комплекса фигурируют в этом случае члены, которые содержат ориентации одновременно двух или более молекул. Вычисление конфигурации максимальной вероятности, соответствующей данной величине U, сильно усложняется.

Так именно дело обстоит в случае ферромагнитных веществ, или жидких кристаллов, где взаимные направляющие действия имеют преобладающее значение. Мы знаем, какие успехи достигнуты в изучении ферромагнетизма благодаря гипотезе молекулярного поля; посредством этого поля Вейсс предложил вычислять результирующую взаимных действий, оказываемых на молекулу. Результаты, полученные от такого упрощения задачи, дают нам возможность предвидеть, насколько важно иметь полное решение этого вопроса.

Уравнение состояния. Вещи представятся нам более простыми, если вместо взаимных ориентирующих действий предположить существование центральных сил между молекулами, действующих согласно данному закону в зависимости от расстояния.

Уравнение состояния жидкости, образованной из тождественных молекул, могло бы быть получено и в более совершенном виде статистическим путем, если бы мы могли решить следующую задачу геометрического характера: если N точек будут распределены случайно в данном объеме, то какова будет вероятность, что взаимные расстояния между этими точками в количестве, равном $\frac{N(N-1)}{2}$, будут распределены некоторым данным образом между различными возможными величинами? Решив эту задачу, мы получим уравнение состояния, которое, естественно, включает и закон взаимодействия между двумя молекулами. И, наоборот, это уравнение дает возможность найти закон взаимодействия, исходя из изотерм, полученных экспериментально для рассматриваемой жидкости. Здесь перед нами *основной вопрос* сцепления частиц, и я обращаю внимание математиков на чисто геометрическую задачу вероятностей, от которой зависит все решение вопроса.

Та же задача имеет большое значение для всей теории смешения жидкостей, и в особенности теории осмотического давления; и если бы уравнение состояния чистой жидкости дало нам в результате закон действия между однородными молекулами, то хорошо известные свойства смесей дали бы закон действия между молекулами различного типа.

В данном случае успех физики опять-таки находится в зависимости от решения проблемы вероятности. Следует находить всегда наиболее вероятное распределение, соответствующее данным условиям.

Общая проблема флюктуаций. В этих первых примерах применения общих рассуждений статистической механики мы рассмотрели только самое вероятное распределение, вокруг которого наши комплексы непрерывно находятся в состоянии флюктуации, обычно незаметной ввиду большой сложности молекулярных комплексов, которые мы наблюдаем.

Но эти флюктуации могут стать доступными опыту, если число молекул, содержащихся в системе, уменьшается (броуновское движение частиц, или рассеяние света, обуславливаемое флюктуациями концентрации в малых объемах порядка куба со стороной, равной длине волны). Мы убедились, каким образом можно предвидеть их значение, применяя очень простые рассуждения о вероятностях в тех случаях, когда имеются флюктуации концентрации газов с малой плотностью, или разбавленных растворов, где различные молекулы можно рассматривать как независящие друг от друга. Вопрос в данном случае чисто геометрического порядка. Если же появляются взаимные действия, уменьшающие флюктуации, когда эти действия носят характер отталкивания, или увеличивающие их, когда они носят характер притяжения, то независимость исчезает, и вопрос, вступая в сферу динамики, может быть разрешен только посредством совершенно новых соображений о вероятностях, которые вводит статистическая механика.

В общей проблеме флюктуаций необходимо изучить самопроизвольные изменения наблюдаемой величины x, характеризующей систему (высота или скорость броуновской частицы, плотность жидкости в малом объеме, интенсивность тока в цепи и т. д.) около величины x_0, соответствующей самому вероятному состоянию (наименьшая высота, которую может занимать точка, нулевая скорость для частицы, плотность, соответствующая равномерному распределению жидкости, нулевая величина силы тока, если цепь не имеет электродвижущей силы и т. д.).

Вопрос в основном сводится к отысканию вероятности $W(x)dx$ того, что рассматриваемая величина заключена между x и $x + dx$. После определения этой вероятности из нее легко

будет вывести среднюю величину любой функции от $x - x_0$, или действия, произведенные флюктуациями, например, на распространение света, частоту, с которой проявляется отклонение $x - x_0$ и которая, как и в предыдущем случае, пропорциональна коэфициенту вероятности.

Эту вероятность можно вычислить двумя различными способами. Прежде всего, можно предположить изолированной сложную систему, образованную нашим комплексом молекул, т. е. предположить, что ее внутренняя энергия постоянна, и затем применить формулу (19) для того, чтобы вычислить вероятность какой-либо конфигурации, подчиненной условию данной энергии. Складывая найденные вероятности для всех конфигураций, при которых наблюдаемая величина заключалась бы между x и $x + dx$, мы, таким образом, получим $W(x)dx$. Следовательно, мы находим то, что можно назвать *флюктуациями при постоянной энергии.*

Приведем одно из рассуждений Эйнштейна, которое хотя и вызывает некоторые затруднения, все же обеспечивает возможность быстрого получения результатов. Каждой величине x соответствует (в термодинамическом смысле) величина энтропии S нашей системы, достигающая своего максимума S_0 для $x = x_0$. Обобщая соотношение Больтцмана (26) между энтропией и вероятностью, мы можем допустить между S и соответствующей величиной коэфициента $W(x)$ отношение

$$S = k \log W,$$

или (что устраняет произвольную постоянную, не введенную в это уравнение)

$$S - S_0 = k \log \frac{W}{W_0},$$

или

$$W = W_0 e^{\frac{S - S_0}{k}}. \tag{27}$$

Эту формулу можно написать иначе. Так как наша система сложная и величина x представляет собой единственный из параметров, необходимых для полного описания состояния системы, то изменение x в тех пределах, которые могли бы достичь флюктуации, не окажет значительного влияния на температуру системы, соответствующую данной внутренней энергии; другими словами — на самую вероятную конфигурацию при условии, что U будет иметь данную величину и что x и $x + dx$ будут соответствовать модулю θ и, следовательно, температуре T, независимой от x.

Если ψ и ψ_0 — величины используемой энергии, соответствующие x и x_0 при этой температуре, то при условии, что внутренняя энергия остается постоянной, мы получим:

$$S - S_0 = \frac{\psi_0 - \psi}{T};$$

так что можно будет написать отношение (27) в виде

$$W = Ae^{-\frac{\psi}{kT}}, \tag{28}$$

где A — константа.

К этому же результату мы можем притти и другим путем, если учесть следующее замечание: очень слабое изменение температуры, сопровождающее флюктуации при постоянной энергии, проявляется в связи со сложностью системы таким образом, что эти флюктуации остаются неизменными, когда система, вместо того чтобы быть изолированной, составляет часть комплекса сложных систем, с которыми она может обмениваться энергией, т. е. когда мы считаем флюктуации изотермическими, а не такими, которые совершаются при постоянной энергии.

Вполне очевидно, что изучение этих изотермических флюктуаций сводится к изучению наиболее вероятного распределения различных конфигураций, возможных в комплексе сложных систем. Эта задача аналогична той, которую мы решаем при помощи формулы (21), с той разницей, что вместо одной молекулы в каждой из систем, образующих комплекс, каждая система сама состоит из большого числа молекул.

Таким образом, фазовое пространство должно иметь, ввиду этого, громадное число измерений, так как каждая сложная система содержит N раз больше параметров, чем каждая из молекул, из которых она состоит.

Искомое распределение определяется формулой, аналогичной (21), но в которой величина E представляет уже не энергию молекулы, а энергию нашей совокупности из N молекул в функции всех параметров, определяющих конфигурацию этой совокупности. Если $d\Omega$ — элемент нового фазового пространства, то вероятность того, что изображающая точка находится в этом элементе, будет:

$$Ce^{-\frac{E}{\theta}} d\Omega. \tag{29}$$

Чтобы изучить колебания по отношению к определенному параметру x, доступному нашим измерениям, т. е. отыскать вероятность того, чтобы этот параметр мог быть заключен между x и $x + dx$, мы должны искать часть протяжения Ω, содержа-

щую изображающие точки, для которых величина x заключалась бы между указанными пределами. Интегрируя в этой части выражение (29), мы получим искомую вероятность в виде:

$$W(x)dx.$$

Обращаясь к статистическому определению, полученному нами для используемой энергии ψ, нетрудно доказать, что предыдущую вероятность можно представить в виде:

$$W(x)dx = Ae^{-\frac{\psi(x)}{\theta}}dx,$$

причем A находится в зависимости от x, но так, что большей частью изменяется очень мало по относительной величине, когда x незначительно уклоняется от x_0. В таком случае A можно рассматривать как постоянную величину, и тогда достаточно знать $\psi(x)$, т. е. используемую энергию системы при данной величине x и температуре T. Модуль θ принимается равным kT. Мы снова находим формулу (28), полученную согласно предположению, что флюктуации адиабатичны.

Таким образом, мы видим, что изучение изотермических флюктуаций столь сложной системы, какой является наша первоначальная совокупность N молекул, около ее самой вероятной конфигурации, сводится к изучению самого вероятного распределения комплекса сложных систем (тождественных первой) между различными возможными конфигурациями. Это — основной факт в исчислении вероятностей; отклонения, если исходить от вероятного распределения, получаются путем рассмотрения самого вероятного распределения внутри комплекса более сложного, чем первый.

Рассмотрим теперь некоторые применения формулы (28) в физике.

Броуновское движение и распределение зерен. Если сложная система образована из зерна и окружающей его жидкости, то для величины x мы можем принять или скорость общего движения зерна, происходящего в каком-то направлении, или его высоту.

В первом случае ψ равно кинетической энергии, соответствующей рассматриваемому направлению и пропорциональной квадрату скорости. Применение формулы (28) дает для средней величины этой кинетической энергии $\frac{\theta}{2}$ или $\frac{kT}{2}$. Таким образом, мы получаем теорему равномерного распределения кинетической энергии по степеням свободы сложной системы в новой форме, применимой к видимым движениям. Я показал, как эта теорема дает возможность простым путем найти известную фор-

мулу, данную Эйнштейном для смещений зерна в силу броуновского поступательного или вращательного движения.

Это равномерное распределение мы находим в обобщенной форме всякий раз, когда свободная энергия ψ представляет собой непрерывную функцию величины x. Действительно, так как величина ψ_0, соответствующая форме равновесия, должна быть минимумом для ψ, то, ограничивая разложение в ряд, вследствие малой амплитуды самопроизвольных изменений, можно написать:

$$\psi - \psi_0 = \alpha (x - x_0)^2,$$

где x — постоянная величина. Из формулы (28) видно также, что средняя величина $\psi - \psi_0$ равна $\frac{kT}{2}$, т. е. что флюктуации для каждого параметра, такого, как x, соответствуют среднему отклонению используемой энергии, равному произведению средней кинетической энергии $\frac{kT}{2}$ молекулы на степень свободы при той же температуре; это указывает на незначительность подобных флюктуаций.

Приложения только что полученного результата можно распространять на спонтанные колебания упругого тела, вроде камертона, на свободные колебания заряда конденсатора, пластинки которого соединены проволокой и электростатическая энергия которого будет иметь среднее значение $\frac{kT}{2}$, на колебания тока в цепи, энергия самоиндукции которой будет иметь ту же среднюю величину, и т. д. В каждой системе, способной совершать периодические колебания, как например, камертон или замкнутый конденсатор, средняя величина потенциальной энергии равна $\frac{kT}{2}$, как и средняя величина кинетической или магнитной энергии. Значит, средняя величина общей энергии должна равняться kT для каждого возможного вида колебания.

Этот результат теряет свою точность, если утилизируемая энергия не будет непрерывной функцией переменной x. Так, например, происходит в случае колебания высоты некоторого весомого зерна. Если m — масса этого зерна, Δ — его плотность, а δ — плотность жидкости, в которую оно погружено, и z — высота положения частицы над основанием сосуда, то мы получим

$$\psi = mg\left(1 - \frac{\delta}{\Delta}\right)z$$

для $z > 0$, а ψ будет практически бесконечной величиной, когда z отрицательно, так как пришлось бы разбить дно сосуда, чтобы зерно смогло опуститься ниже $z = 0$. Следовательно, при

$z = 0$ ψ будет минимальной величиной; однако разложение в ряд выглядит в данном случае не так, как раньше. Согласно (28), W будет нулем при отрицательном z, а при z положительном оно равняется

$$W = W_0 e^{-\frac{mg}{kT}\left(1 - \frac{\delta}{\Delta}\right) \cdot z}.$$

В этом уравнении мы узнаем закон распределения, экспериментально проверенный Перреном. Термодинамика предусматривает положение равновесия $z = 0$, для которого используемая энергия является минимальной, а присутствие зерен в жидкости над дном соответствует колебаниям высоты, управляемым законом вероятности, который мы только что вывели. Приведенный нами пример показывает также, что одну и ту же проблему можно рассматривать или как проблему самого вероятного распределения, или как проблему флюктуаций.

Если мы в данном случае вычислим среднюю величину ψ или флюктуаций используемой энергии, соответствующих переменной величине z, то благодаря особой форме этой функции можно будет найти величину kT вместо $\frac{kT}{2}$.

Флюктуации концентрации. Случай флюктуаций концентрации и жидкости, в которой молекулы влияют друг на друга, входит в общую задачу. В данном небольшом объеме внутри жидкости средняя концентрация будет колебаться вокруг концентрации, соответствующей равномерному распределению жидкости. Отклонение $\psi - \psi_0$ пропорционально в первом приближении квадрату изменений концентрации, а эти изменения, следовательно, таковы, что средняя величина $\psi - \psi_0$ равна $\frac{kT}{2}$. Этого вполне достаточно, чтобы дать всю количественную теорию критической опалесценции, так как известны все степени мутности жидкости.

Непрерывные и прерывные вероятности. Мы видели, что для любого вида периодических колебаний в системе статистическая механика предусматривает общую среднюю величину энергии, равную kT. Примененный к молекулам твердого тела, этот результат дает возможность предсказать для данного тела удельную теплоемкость, постоянную при всех температурах. В применении к электромагнитным резонаторам Планка этот результат приводит к закону Рэлея для распределения энергии в черном излучении. Опыт находится в явном противоречии с этим результатом.

Откуда возникли эти затруднения?

В наших рассуждениях о статистической механике, и в частности при вычислении средних величин, которое привело нас к теореме равномерного распределения, мы молчаливо допускаем,

что речь идет о непрерывных вероятностях. Мы всюду заменили суммирование интегрированием, т. е. элементарную область фазового пространства $\Delta\omega$, введенную нами с целью определения вероятности, мы рассматриваем как бесконечно малую величину. Но этот переход к пределу вызывает большие затруднения. Не считая того, что исчезающе малые участки фазового пространства не будут содержать количества Δn изображающих точек в такой мере, чтобы можно было и впредь пользоваться формулой Стирлинга, можно заметить, что постоянная A формулы (25), дающая логарифмы вероятности, содержит выражение $\log\Delta\omega$, который становится бесконечным, когда $\Delta\omega$ стремится к нулю.

Мы избежим этих затруднений и одновременно уясним себе, что такое экспериментальные законы удельной теплоемкости и излучения абсолютно черного тела, если допустим, вместе с Планком, существование определенного конечного протяжения для элементарной области $\Delta\omega$, т. е. если непрерывные вероятности заменим прерывными. Закон самого вероятного распределения выражается всегда формулой (21), так же как и в нашей первой части аналогичная формула (14) применяется ко всем случаям; но при этом изменяются отношения между модулем θ или τ и средней величиной переменной E или t. Непрерывные вероятности дают нам $t = \tau$ для средней продолжительности серий, так же как они дают $E = \theta$ для средней энергии резонатора. Вводя прерывные вероятности в формулу (16), Планк показал, что если в приведенном случае резонатора h представляет собой величину, характеризующую элементарную область фазового пространства, то соответствующее ему изменение энергии будет $\varepsilon = h\nu$; так как ν есть частота резонатора, то мы получаем формулу, совершенно схожую с (16):

$$\overline{E} = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{\varepsilon}{\theta}} - 1}. \tag{30}$$

С помощью этого результата можно измерить с известной точностью величину изменения теплоемкости твердых тел в зависимости от температуры и распределения энергии в черном излучении. Действительно, наш резонатор находится в равновесии с излучением, точно представленным ранее приведенным экспериментальным законом:

$$F(\lambda T) = \frac{C}{e^{\frac{c}{\lambda T}} - 1},$$

полагая

$$\frac{c}{\lambda T} = \frac{\varepsilon}{\theta} = \frac{h\nu}{kT},$$

или, если V — скорость света:

$$c = \frac{hV}{k}.$$

Постоянная величина h, являющаяся как бы мерилом протяженности элементарной области вероятности в задаче резонатора, должна иметь, по нашему мнению, капитальное значение в физике и фигурировать в законах большого числа явлений. Нетрудно понять, что в действительности так оно и должно быть, потому что эта же константа, очевидно, определяет элементарную область вероятности во всех вопросах статистической механики, какова бы ни была сложность изучаемой системы. Опыт подтвердил ее применение не только в теории черного излучения, но и в теории испускания рентгеновских лучей, вторичных катодных лучей, в явлениях фотоэлектричества и даже в законах химической механики. Также достоверно, по нашему мнению, и то, что она определяет величину магнетона или прерывный элемент молекулярного магнитного момента.

Итак, прерывность, повидимому, господствует во всех областях физики. Нельзя ограничиваться признанием существования только прерывных структурных элементов, — электронов, атомов и молекул; мне кажется, необходимо ввести новый элемент прерывности в статистические рассуждения, посредством которых на основе этих элементов мы могли бы построить картину мира.

ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ПРИНЦИПА ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ *

Замечательные экспериментальные подтверждения недавно обратили внимание физиков на теорию относительности. В той общей форме, какую ей придал Эйнштейн она полностью объясняет движение перигелия Меркурия, без введения какой-либо гипотезы или произвольной постоянной, и определяет количественное отклонение световых лучей полем тяготения Солнца именно таким, какое подтвердили измерения, сделанные в течение полного затмения 29 мая 1919 г.

Развитие этой теории происходило двумя этапами: этап ограниченной относительности ** — от 1905 до 1912 г. — и этап общей относительности, существенные результаты которого были достигнуты в конце 1915 г. Первая форма принципа относительности, ограниченная областью равномерных прямолинейных поступательных движений, привела к экспериментальным следствиям, не менее существенным, чем экспериментальные следствия общего принципа.

Отправная точка теории также экспериментальна — это тот, проверенный с большой точностью факт, что физические явления следуют одним и тем же законам во всех материальных системах, находящихся в равномерном и прямолинейном поступательном движении одни по отношению к другим. В частности, Земля, рассматриваемая на своей орбите в двух диаметрально противоположных положениях, с интервалом в 6 месяцев, связана с системами осей, движущихся одна по отношению к другой со скоростью 60 *км/сек*, и ни один опыт, использующий земные явления, не позволяет нам отличить эти два положения.

Таким образом, ученые пришли к следующей формулировке ограниченного или частного *принципа относительности:*

Уравнения, выражающие законы физики, должны быть одними и теми же для всех систем координат, находящихся в равномерном и прямолинейном поступательном движении одни по

---

* Доклад, представленный Французскому физическому обществу 6 февраля 1920 г. — *Прим. ред.*

** В современной литературе почти не употребляется термин «ограниченная теория относительности». Ее называют частной или специальной теорией относительности. — *Прим. ред.*

отношению к другим; они должны сохранять свою форму, когда в них подставляются вместо измерений какого-либо явления, сделанных первой группой наблюдателей, значения этих же измерений как функций измерений, сделанных другой группой, движущейся равномерно и прямолинейно по отношению к первой.

Это условие действительно выполняется двумя теориями. Во-первых, рациональной механикой, уравнения которой сохраняют свою форму, когда в них производятся (на переменных пространства и времени x, y, z, t, определяющих положение какого-либо события по отношению к какому-либо выбранному произвольно начальному событию) подстановки *группы Галилея.* Наиболее простая форма этих подстановок относится к переходу от одной системы координат (x, y, z, t) к другой системе (x', y', z', t'), находящейся в равномерном и прямолинейном движении по отношению к первой со скоростью v в направлении оси x. Предполагая, что соответствующие оси параллельны в обоих системах, можно написать:

$$x = x' + vt', \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'. \tag{1}$$

Эта группа характеризуется:

1) Понятием *абсолютного времени,* что видно из соотношения $t = t'$. Оно выражает собой то положение, что интервал времени между двумя событиями — безразлично, находятся ли они между собой на некотором расстоянии в пространстве или нет, — измеряется всегда одним и тем же способом, какова бы ни была система координат (при применении одних и тех же единиц измерения). В частности, два события ($t' = 0$), одновременные для одной группы наблюдателей, одновременны ($t = 0$) и для всех других групп наблюдателей, движущихся по отношению к первым.

2) Понятием *абсолютного пространства:* форма тела, определенная совокупностью одновременных положений его точек, если оно находится в движении, является одной и той же для всех систем координат, потому что одновременность имеет один и тот же смысл для всех систем координат.

3) Обычной формулой сложения скоростей: $v_1 = v + v'$.

Второй теорией, уравнения которой удовлетворяют принципу ограниченной относительности, является электромагнитная теория в той форме, которую ей дали Максвелл, Герц и Лоренц. Лоренц показал, что эти уравнения сохраняют свою форму лишь тогда, когда (на переменных пространства и времени) производят подстановки *группы Лоренца;* наиболее простая форма их дается нижеследующими уравнениями, где β представляет собой отношение $\frac{v}{V}$ относительной скорости двух

систем координат к скорости света, которая вводится при посредстве соотношения $V=\frac{1}{\sqrt{K\mu}}$:

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\,(x'+vt'); \quad y=y'; \quad z=z'; \\ t &= \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t'+\frac{v}{V^2}\,x'\right). \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Эта группа характеризуется:

1) *Относительным характером времени:* два события, одновременные для одной системы координат ($t=0$), как правило, не одновременны для другой системы, если они происходят в различных местах ($x' \lessgtr 0$).

2) *Относительным характером пространства:* поскольку одновременные положения различных материальных точек одного и того же тела определяются различными группами наблюдателей по-разному, то тело не может иметь одну и ту же форму для всех наблюдателей. В частности, это тело окажется тем более сплющенным в направлении движения (сокращение Лоренца), чем более быстро движущимся будут видеть его наблюдатели.

3) ***Сложением скоростей:*** дифференцируя первое и последнее уравнения (2) и разделяя их почленно, мы получаем, если v и v' являются скоростями $\frac{dx}{dt}$ и $\frac{dx'}{dt'}$ одного и того же движущегося тела по отношению к двум системам координат:

$$v_1=\frac{v+v'}{1+\frac{vv'}{V^2}}. \tag{3}$$

Вытекающая из приведенных выше фактов глубокая разница между рациональной механикой и электромагнитной теорией, указывающая на невозможность механического объяснения электромагнитных и оптических явлений, может быть выражена еще и так: электромагнитная теория пользуется *оптическим временем,* в то время как рациональная механика использует *абсолютное время.*

Действительно, мы снова находим группу Лоренца, допуская — для реализации согласования времен в двух различных местах — метод оптических или электромагнитных сигналов (сигналы беспроволочного телеграфа) и опираясь на экспериментальный факт (Майкельсона и Морли), что свет распространяется с одной и той же скоростью V по всем направлениям для всех систем координат, каково бы ни было их взаимное равномерное и прямолинейное перемещение. Это изотропное распространение света, впрочем, в точности соответствует предвидениям электромагнитной теории.

Трансформация новой кинематики обладает свойством, являющимся необходимым следствием вышеизложенного, а именно: остается инвариантным количество

$$s^2 = t^2 - \frac{l^2}{V^2}, \tag{4}$$

где t — интервал во времени двух событий и $l^2 = x^2 + y^2 + z^2$ — их расстояние в пространстве. Для двух бесконечно близких друг другу событий этот инвариант становится:

$$ds^2 = dt^2 - \frac{1}{V^2}(dx^2 + dy^2 + dz^2).$$

Мы видим, что, если бы сигнал, использованный в целях установления совпадения времени в различных точках, распространялся с бесконечной скоростью, инвариант ds слился бы с инвариантом dt и мы снова получили бы абсолютное время рациональной механики. Это понятие, следовательно, связано с понятием неизменяемого твердого тела или любого другого способа мгновенной сигнализации на расстоянии, способа, который в нашем опыте не существует.

Кинематика группы Лоренца (кинематика Эйнштейна), напротив, имеет следующее экспериментальное основание:

1) физическую эквивалентность систем координат, находящихся в относительном равномерном и прямолинейном поступательном движении;

2) тот факт, что единственное реальное экспериментальное измерение времени в двух различных местах получается путем использования оптических или электромагнитных сигналов (оптическое время);

3) тот экспериментальный факт, что для всех систем координат, находящихся в относительном равномерном и прямолинейном движении, свет распространяется с одной и той же скоростью во всех направлениях.

Различные экспериментальные следствия подтвердили новую точку зрения, противоположность которой по отношению к старой кинематике выражает один из конфликтов между теориями мгновенного действия на расстоянии (рациональная механика, небесная механика Ньютона) и теорией действий от точки к точке, введенной Гюйгенсом и Фарадеем на заре развития оптики и электромагнетизма.

Увлечение волн. Формула (3) сложения скоростей дает чисто кинематическое объяснение знаменитого закона частичного увлечения световых волн преломляющими средствами, найденного Френелем и экспериментально проверенного Физо. Если $U = \frac{V}{n}$ скорость волн по отношению к преломляющей среде с показателем преломления n, к среде, которая сама движется со

скоростью v в направлении распространения, то скорость U_1 волн по отношению к наблюдателям будет, согласно (3):

$$U_1 = \frac{v+U}{1+\frac{vU}{V^2}} = U + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right),$$

ограничивая разложение членами первого порядка от v. Это именно и есть закон увлечения волн.

Динамика относительности. Новой кинематике соответствует и новая динамика, более простая, чем прежняя, по следующим основаниям:

1) Закон инерции, согласно которому свободная материальная точка принимает движение прямолинейное и равномерное, выражается условием

$$\delta \int ds = 0, \tag{6}$$

причем интеграл взят между двумя данными событиями по *мировой линии*, пробегаемой движущимся телом.

Прямолинейное и равномерное движение, таким образом, играет во вселенной ограниченной относительности такую же роль, какую играет прямая линия в эвклидовой геометрии. Оно представляется геодезической линией определенной длины, подобно тому как световые лучи представляются геодезическими линиями нулевой длины, так как, согласно определению (5) инварианта ds, каждый их элемент ds равен нулю. По аналогии мы будем называть эвклидовой вселенной вселенную ограниченной относительности, определенную, с точки зрения кинематики, трансформациями группы Лоренца.

2) Понятие массы сливается с понятием энергии: масса материальной системы в современном представлении непостоянна, как это утверждала рациональная механика, но изменяется пропорционально всей энергии E системы, согласно соотношению *:

$$m = \frac{E}{V^2}. \tag{7}$$

В частности, увеличение энергии движущегося тела в зависимости от скорости (кинетической энергии) сопровождается увеличением массы, согласно формуле:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \tag{8}$$

где m_0 — масса рассматриваемого тела в состоянии покоя.

* См. статью П. Ланжевена «Инерция энергии и ее следствия» (стр. 216). — *Прим. ред.*

Это изменение (8) было проверено учеными Ш. Е. Гюи и Лаванши экспериментально на катодных частицах — до скоростей порядка 150 000 км/сек ($\beta = \frac{1}{2}$), и на β-частицах радиоактивных тел — до скоростей, очень близких к скорости света.

Применение новой динамики к внутриатомным движениям (модель атома Бора) позволило Зоммерфельду предусмотреть количественно структуру спектральных линий водорода серии Бальмера, а также структуру спектральных линий K-серии рентгеновских лучей до элементов с наиболее высоким атомным весом, как уран.

Закон инерции энергии непосредственно объясняет давление излучения (инерции лучистой энергии), так же как и небольшие отклонения атомных масс элементов от целых кратных атомного веса водорода, в согласии с учением о единстве материи, вытекающем сейчас из опыта.

Поскольку, таким образом, предвиденные изменения масс сопровождаются изменениями веса (вследствие постоянства ускорения силы тяжести для различных тел, экспериментально проверенного с большой точностью Этвешом), то мы приходим к предположению, что энергия весома, будучи в то же время инертной; это — первое указание на связь между явлениями тяготения и явлениями электромагнетизма.

Развитие последствий только что указанного нами замечания привело Эйнштейна к обобщению принципа относительности, причем Эйнштейн пришел к этому примерно тем же путем, по которому шел Гаусс, когда разрабатывал теорию поверхностей, и указал на возможность высказать — в форме, независимой от системы криволинейных координат, используемых для определения точек поверхности, — законы геометрии для линий, нанесенных на эту поверхность или на любые другие поверхности, которые с ней могут быть совмещены.

Прежде всего, Гаусс допускает существование касательной плоскости к каждой точке поверхности, т. е. то, что на бесконечно малой площади около какой-нибудь точки выполняются законы эвклидовой геометрии на плоскости. Следовательно, расстояния ds двух бесконечно близких друг к другу точек мы можем измерить простыми приемами геодезической съемки и выразить вблизи каждой точки, характеризуемой криволинейными координатами u и v, квадрат ds^2 расстояния между двумя бесконечно близкими точками, координаты которых отличаются на du и dv выражением, имеющим форму:

$$ds^2 = E\,du^2 + 2\,F\,du\,dv + G\,dv^2. \tag{9}$$

Величины E, F, G имеют в каждой точке определенные значения, которые выводятся из обычных геодезических измери-

тельных операций, сделанных вблизи этой точки. Они изменяются в зависимости от u и v, когда передвигаются по поверхности. Геометрические свойства линий, нанесенных на поверхность, полностью определяются, если известны три величины E, F, G, как функции u и v, и выражаются уравнениями, которые обладают, благодаря введению трех указанных функций и их производных, формами, независимыми от используемой системы криволинейных координат. В частности, дифференциальное уравнение геодезических линий (играющих роль, аналогичную прямой линии на плоскости) получается из того, что эти линии имеют стационарную длину между двумя точками, т. е. математически:

$$\delta \int ds = 0. \tag{10}$$

Кроме того, Гаусс показал, что в каждой точке поверхности существует функция от E, F, G и их первых и вторых производных, которая является абсолютным *инвариантом,* принимающим одно и то же значение, какова бы ни была система используемых координат. Это — полная, или гауссова, кривизна, точнее — произведение двух кривизн главных сечений в данной точке. Геометрия поверхности будет эвклидовой, если гауссова кривизна является нулевой во всех точках развертываемой на плоскости поверхности; она будет неэвклидовой геометрией Римана, если эта кривизна имеет постоянное положительное значение (сфера или поверхности, налагаемые на сферу), или же неэвклидовой геометрией Лобачевского и Больяи, если гауссова кривизна имеет постоянное отрицательное значение.

Вот параллельное развитие идей общей теории относительности.

Мы пришли к допущению, что лучистая энергия весома, что свет не распространяется по прямой линии в поле тяготения, так же как брошенное тело не движется в поле тяготения прямолинейно и равномерно.

Впрочем, возможно, по крайней мере локально, устранить эффекты тяготения, используя систему координат, находящуюся в свободном падении и без вращения, например снаряд Жюля Верна, в котором все тела движутся по отношению к стенкам прямолинейно и равномерно и по отношению к которому, следовательно, не существует поля тяготения. Если мы допустим вместе с тем, что свет распространяется в снаряде по прямой линии (по отношению к осям, связанным со снарядом), то вселенная будет эвклидовой для наблюдателей, находящихся в свободном падении.

Но вселенная будет таковой только в бесконечно малой области. Действительно, поскольку поле земного тяготения не равномерно, тела внутри снаряда Жюля Верна движутся прямоли-

нейно и равномерно по отношению к снаряду только в ограниченной области и в непосредственном соседстве с ним. Эвклидова вселенная, связанная с этим снарядом, является лишь касательной к реальной вселенной. Проведенные в ней измерения, аналогичные измерениям в касательной плоскости, позволяют исчислить ds^2 между двумя событиями по формуле (5) только в бесконечно малой области вселенной. Гипотеза Гаусса о существовании касательной плоскости аналогична следующей:

В любом месте и в любой момент (при любом событии) имеется эвклидова вселенная, касательная к реальной вселенной; это — вселенная наблюдателей, связанных с материальной системой, находящейся в свободном падении.

И, наоборот, если применение подходящей системы координат позволяет устранить поле тяготения хотя бы локально, то употребление произвольной системы координат будет эквивалентно введению поля тяготения, соответственным образом распределенного (принцип эквивалентности Эйнштейна).

Действительно, если предположить, что мы сообщили снаряду Жюля Верна движение с некоторым определенным ускорением, то для наблюдателей, связанных с этим снарядом, все произойдет (вследствие постоянства g для всех тел) так, как если бы появилось равномерное поле тяготения с напряжением, равным общему сообщенному ускорению.

Аналогично этому, если снаряд приводится во вращательное движение, физические законы по отношению к осям, связанным с ним, будут такими же, как и в неравномерном поле тяготения, распределенном подобно полю центробежного ускорения. В частности, измерения, сделанные на Земле при помощи маятника, дают поле тяготения, из которого при помощи одного лишь опыта нельзя выделить действия, относящегося к центробежной силе.

Следовательно, оказывается возможным — и это есть выражение принципа общей относительности — высказать законы физики в одной и той же форме для всех систем координат, находящихся в любом движении, благодаря введению соответственно распределенных полей тяготения.

Аналитическая интерпретация производится так же, как и в теории поверхностей. Употребление какой-либо системы координат (моллюск Эйнштейна) приводит к характеристике или к определению каждого события четырьмя какими-либо координатами, (x_1, x_2, x_3, x_4), аналогичными координатам u и v Гаусса. Употребление системы координат в свободном падении позволяет в каждом событии (подобно тому, как это происходит в касательной плоскости к поверхности) определить ds^2 между

двумя бесконечно близкими друг к другу событиями как функцию dx_1, dx_2, dx_3, dx_4 в форме, аналогичной формуле (9).

$$ds^2 = \sum g_{ik} dx_i dx_k, \qquad 1)$$

причем индексы i и k принимают значения 1, 2, 3, 4.

Уравнения движения свободной точки, которое определено попрежнему условием геодезической линии (6), выражаются в форме, независимой от системы координат, благодаря введению g_{ik}, аналогичных E, F, G Гаусса; форма этих уравнений показывает, что g_{ik} играют роль, аналогичную той, которую играет потенциал тяготения в обычной механике; по этой причине их называют *обобщенными потенциалами* тяготения.

Кинематические свойства вселенной характеризуются величинами g_{ik}, вообще говоря, изменяющимися вместе с x, так же как геометрические свойства поверхности характеризуются E, F, G. Движение свободной точки представляется *геодезической* линией этой вселенной, и траектория светового луча является *геодезической линией нулевой длины.*

Законы физики строго определяются условием принятия формы, независимой от системы координат, *инвариантной* или *ковариантной* для любых изменений этой системы.

В частности, Эйнштейну удалось получить уравнения, определяющие распределение поля или потенциалов тяготения как функции распределения материи и излучения, т. е. наличной энергии. Эти уравнения должны заменить собой те, которые выражают ньютоновский закон тяготения и которые принимают в пустоте форму Лапласа:

$$\Delta\varphi = 0, \qquad (12)$$

а в материи — форму Пуассона:

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho, \qquad (13)$$

где φ — потенциал тяготения в обычном значении, G — постоянная тяготения и ρ — плотность материи.

Учитывая, что в искомые уравнения, по аналогии с (12) и (13), должны входить только g_{ik} с их первыми и вторыми производными, а также принимая во внимание условие сохранения их формы для всех изменений координат, Эйнштейн мог разрешить проблему, используя существование одного элемента (аналога полной кривизны Гаусса, соответствующего всем наложенным условиям) — элемента, известного под именем *тензора Римана—Кристоффеля.*

Полученные таким образом уравнения для определения распределения обобщенного тяготения были проинтегрированы — приближенно Эйнштейном и полностью Шварцшильдом — для случая одного материального центра массы M.

Для ds^2 в сферических координатах r, θ, φ получилось выражение:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{V^2 r}\right) dt^2 -$$

$$- \frac{1}{V^2}\left[r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\varphi^2 + \left(1 - \frac{2GM}{V^2 r}\right)^{-1} dr^2\right]. \qquad (14)$$

Геодезические линии этой вселенной получаются легко и соответствуют для тел, находящихся на конечном расстоянии, эллиптическому движению Кеплера с вращением перигелия, равным на каждый оборот

$$\delta\bar{\omega} = \frac{3GM}{V^2 a(1-e^2)},$$

причем a является большой полуосью, а e — эксцентриситетом эллиптической орбиты.

Эта формула в точности дает движение перигелия Меркурия (43 секунды за 100 лет), *если в нее подставить вместо* M *значение массы Солнца, а вместо* a *и* e *— известные значения для Меркурия.*

Поскольку траектория светового луча является геодезической линией нулевой длины, мы легко получаем траекторию, обращенную к центру притяжения с общим отклонением между крайними направлениям:

$$\alpha = \frac{4GM}{RV^2},$$

где R — минимальное расстояние луча до центра притяжения.

Для звезды, видимой в непосредственной близости к краю Солнца, эта формула дает значение (при R, равном радиусу Солнца):

$$\alpha = 1'',74,$$

что в точности подтвердилось измерениями, сделанными во время полного затмения 29 мая 1919 г.

Наконец, для событий, происходящих в одной и той же точке на расстоянии R от центра ($dr = d\theta = d\varphi = 0$ и $r = R$), формула (14) дает:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{RV^2}\right) dt^2.$$

Если бы та же последовательность событий (световое колебание атома) происходила на большом расстоянии от Солнца (например, на Земле), мы получили бы то же самое ds^2 (когда два последовательных события происходят на атоме, находя-

щемся в свободном падении в обоих случаях), но dt отличное от предыдущего и определяемое следующим уравнением (R предполагается бесконечным):

$$ds^2 = dt'^2 ,$$

откуда

$$dt = \frac{dt'}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{RV^2}}} = dt' \left(1 + \frac{GM}{RV^2} \right)$$

в первом приближении.

Следовательно, период световых колебаний одного и того же атома на поверхности Солнца должен быть длиннее, чем на Земле; спектральные линии солнечного спектра должны быть смещены к красному концу на величину:

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{RV^2} = 2{,}11 \cdot 10^{-6},$$

по сравнению с соответствующими линиями, испущенными земным источником, т. е. приблизительно на одну тысячную единицы Ангстрема в желтых лучах.

В заметке, появившейся в английском журнале «Nature» от 29 января 1919 г., Эйнштейн указывает, что это предвидение недавно было подтверждено экспериментально.

Кроме того, это предвидение предполагает, как это вытекает из предыдущего рассуждения, что атомы или молекулы хромосферы, в которой появляются линии поглощения солнечного спектра, ведут себя так, как если бы они находились в свободном падении в течение наибольшего промежутка времени и не деформировались бы реакцией, необходимой для того, чтобы удержать их в равновесии в поле тяготения Солнца. Это условие, конечно, выполняется в верхних областях хромосферы.

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ РОЛЬ ИСТОРИИ НАУКИ *

Я должен извиниться за несколько абстрактный характер доклада, предлагаемого сегодня вашему вниманию. В выборе темы мною руководило желание поделиться с вами некоторыми соображениями и узнать ваше мнение по вопросу о преподавании научных дисциплин (и в частности экспериментальных наук, как области, в которой я больше всего заинтересован), а также о роли, которую *может* и *должен* играть подход с позиций историзма в деле подготовки будущих преподавателей.

Нельзя не признать того факта, что исторический подход, лежащий в основе преподавания таких дисциплин, как литература и философия, пока что не играет почти никакой роли в преподавании точных наук.

Новейшие программы преподавания музыки в средней школе — и те включают краткий обзор важнейших этапов и биографии наиболее выдающихся деятелей в истории развития этого искусства, но этого нет в программах преподавания точных наук.

А между тем преподавание точных наук от этого может только выиграть. Рассмотрим общее положение вопроса с преподаванием точных наук в наших школах. Оно определяется причинами двоякого порядка — исторического (к рассмотрению которых мы вернемся позднее) и практического. Ограниченное время, которое отводится в школьных программах преподаванию точных наук, вынуждает пожертвовать историей предмета и сосредоточить все внимание на практической стороне вопроса. Рассмотрение программ наших средних учебных заведений (лицеев и колледжей) показывает, что преподавание точных наук сводится, в основном, к ознакомлению учащихся с фактами и законами. Научные факты преподносятся чисто догматически; учащиеся заучивают законы, формулы, выражающие эти законы, и их приложения. Конечной целью обучения является, как правило, последующее практическое применение полученных знаний в какой-либо профессии, например инженера. Такая тен-

* Доклад, прочитанный в Педагогическом музее и опубликованный в «Bulletin de la Société Française de Pedagogie», № 22 за 1926 г. — *Прим. ред.*

денция к «догматическому искажению» наблюдается всегда, когда преподавание подчинено чисто утилитарным целям. Оно далеко от специализации в средней школе; преподавание же в начальной школе, определяющее умственное развитие ребенка между 8—12 годами и формирующее его на всю жизнь, также чисто утилитарно и, следовательно, догматично. Я попытаюсь показать здесь, как много теряет преподавание точных наук, ограничиваясь таким чисто догматическим подходом и пренебрегая исторической точкой зрения.

Во-первых, преподавание теряет всякий интерес. Догматическое преподавание холодно, сухо, статично и создает у детей неверное представление о науке, как о чем-то раз и навсегда определенном и мертвом.

Говоря лично о себе, я должен признать, что если бы я ограничился впечатлениями, полученными мною в детстве в результате первого знакомства с наукой (хотя о своих тогдашних учителях я сохранил самое благодарное воспоминание), и не изменил их впоследствии при столкновении с реальной действительностью, то наука осталась бы в моем представлении как нечто раз навсегда законченное, как область, в которой дальнейшие открытия невозможны, между тем как на деле мы находимся лишь в младенческом периоде ее развития. Внушение учащемуся убеждения, что нам якобы остается только вывести следствия из ранее установленных фактов, является заблуждением, в результате которого преподавание точных наук лишается всякого смысла.

Этот недостаток свойственен не одной только Франции, однако следует отметить, что у нас он доходит до того, что избегают включения в школьные программы всех новых идей, еще не достигших своего завершения. Только те теории, справедливость которых, хотя бы и кажущаяся, проверена долголетним опытом, имеют право гражданства в наших классических учебниках. Между тем наука меняется настолько быстро, что на деле все эти учебники очень скоро оказываются безнадежно устаревшими.

Ничто так не способствует общему развитию и формированию детского сознания, как знакомство с историей человеческих усилий в области науки, отраженной в жизнеописаниях великих ученых прошлого и в постепенной эволюции идей.

Только таким путем мы можем подготовить им достойных преемников и внушить подрастающему поколению представление о непрерывном развитии и гуманитарной ценности науки. Если это имеет большую важность для тех, кто собирается посвятить всю свою деятельность научной работе, то еще большее значение имеют эти соображения для будущих преподавателей

и, главным образом, для тех широких масс, все знакомство которых с наукой ограничивается школьным курсом. Позвольте мне для иллюстрации моей мысли привести одно личное воспоминание.

Когда я был студентом Нормальной школы, мне как-то пришлось провести урок на тему о перекиси водорода. Учебники, к которым я обратился для подготовки к уроку, содержали описание всех реакций этого вещества, его физико-химических свойств и пр. Не удовлетворившись этим, я обратился к оригинальным работам Тенара, открывшего перекись водорода. Просматривая эти замечательные работы, опубликованные более ста лет назад и изложенные прекрасным языком, я заметил, что все наиболее интересное, в частности все соображения, натолкнувшие Тенара на это открытие, а также и его глубокие соображения относительно механизма процесса окисления, не потерявшие своей актуальности и в наши дни, не нашло места в руководствах, с которыми обычно приходится иметь дело учащимся. То, что прошло через фильтр нескольких поколений составителей учебников, оказалось наименее интересным. К сожалению, этот пример не является исключением. Ничто не может заменить непосредственного обращения к первоисточникам, возможно более частого общения с творчеством создателей науки.

Другой типичный пример будет взят из области, вызвавшей большой интерес со стороны широкой публики. Я говорю о теории относительности. В этой области теория и практика приводят нас к выводу, что наша обычная, или эвклидова, геометрия не является единственно возможной и наилучше приспособленной для изображения внешнего мира; что существуют другие геометрии, значительно более простые, несмотря на кажущуюся сложность, и значительно превосходящие геометрию Эвклида. Работы Лобачевского, Больяи, Римана и др. привели к разработке неэвклидовых геометрий, превосходящих классическую геометрию по широте возможностей и не уступающих ей по строгости. Знакомясь с творчеством Эвклида только по переводам, мы не вполне уясняем себе, что в действительности основатель классической геометрии гораздо лучше многих своих комментаторов отдавал себе отчет в трудностях, связанных с принятием основных геометрических принципов, и в произвольном характере знаменитого постулата, согласно которому через точку может быть проведена только одна параллельная к данной прямой. Более близкое знакомство с подлинником позволило бы избегнуть многих бесплодных попыток доказательства этого постулата.

Для борьбы с догматизмом в науке бывает очень полезно ознакомиться с тем, насколько основатели научных теорий лучше

своих продолжателей и комментаторов отдавали себе отчет во всех слабостях и недостатках своих теорий. Со временем их оговорки постепенно забываются; то, что для них было гипотезой, превращается в догму, становящуюся все более непререкаемой по мере удаления от первоисточника, пока, наконец, не потребуется значительное усилие для того, чтобы порвать с установившимися взглядами, представляющими собой более или менее отдаленные выводы из теорий, временный и гипотетический характер которых давно забыт.

Прекрасным примером подобного окостенения теории в результате превращения ее в догму является ньютоновская концепция всемирного тяготения, которая, после двух веков неоспоримого господства, нашедшего свое выражение в создании классической небесной механики, в настоящее время должна быть в известной мере оставлена как несовместимая с более точными данными опыта.

В то время как Ньютон объяснял сложные движения планет существованием силы притяжения, действующей на расстоянии между телами, движущимися в неизменном эвклидовом пространстве, новая теория относительности полагает, что каждое тело самым фактом своего присутствия изменяет свойства окружающих его времени и пространства, искривляет время-пространство и что в результате этой деформации спонтанное движение соседних с ним тел также оказывается измененным. Так как пространство не обладает больше свойствами эвклидова пространства, то движение брошенного в него тела перестает быть прямолинейным и равномерным и принимает сложный вид, известный нам из опыта. Аналогичным образом шарик, пущенный в чашке, будет совершать более или менее круговое движение, в то время как тот же шарик на ровной доске будет двигаться прямолинейно. Вместо неизменного пространства, в котором осуществляются мгновенные действия на расстоянии между телами, опыт приводит нас к представлению о деформируемом пространстве, деформирующемся постепенно от точки к точке около помещенных в него тел. Геометрия, которая на большом расстоянии от скоплений материи в значительной степени приближается к эвклидовой, все более отклоняется от нее по мере приближения к материальным массам и притом в степени, возрастающей с увеличением масс. Однако, если мы познакомимся с сочинениями Ньютона в подлиннике, то увидим, что он далеко не так категоричен в своих выводах, как это можно заключить по высказываниям тех, кто счел возможным придать его доктрине характер окончательности. Ньютон рассматривает притяжение на расстоянии лишь в качестве гипотезы, предназначенной для изображения фактов, причем он ясно представляет себе все трудности,

связанные с принятием этой гипотезы. Впоследствии, под влиянием успехов этой теории, ученики Ньютона пошли дальше своего учителя и придали ей тот догматический характер, который так затрудняет в настоящее время ее пересмотр. Подход к преподаванию с позиций историзма, более динамическая концепция далеко еще не завершенного приспособления идей к экспериментальным фактам, развитие гибкости ума под влиянием непосредственного общения с трудами великих ученых прошлого могли бы способствовать преодолению многих сомнений и предубеждений при столкновении с новыми идеями.

В качестве общего правила можно утверждать, что обращение к первоисточникам вносит ясность и дает новый толчок научной мысли.

Попытка Эйнштейна написать историю механики (что еще за 40 лет до него с успехом было осуществлено Махом) * явилась толчком, направившим мысль Эйнштейна на создание новых представлений.

Приведенные мною примеры показывают всю важность знакомства с историей идей как с точки зрения преподавания, так и с точки зрения научного исследования. Ничто так не помогает проникновению в сущность научной теории, как чтение сочинений выдающихся ученых прошлых времен и живое общение с учеными современниками.

Необходимость знакомства с историей применения великих открытий на практике настолько очевидна, что вряд ли это нуждается в доказательстве.

Так, история техники освещения, знакомя нас с рядом как бесплодных, так и удачных попыток множества изобретателей, возвышает нас и дает нам почувствовать наличие тесной связи и преемственности между нами и остальным человечеством в его непрерывных усилиях изменить мир и подчинить его власти человеческой мысли. Я вспоминаю впечатление, произведенное на меня в детстве чтением старой книги Луи Фигье «Чудеса науки». Научное значение этого произведения, возможно, невелико, но эмоциональная и воспитательная ценность его несомненна. Написать историю изобретений сравнительно нетрудно; история же идей — задача значительно более сложная и вместе с тем более плодотворная с воспитательной точки зрения. В дальнейшем я попытаюсь показать, насколько изучение истории идей и знакомство с великими этапами в развитии цивилизации спо-

* Ланжевен совершенно некритически оценивает работы Маха по истории механики. Он не замечает, что история механики была Махом фальсифицирована в идеалистическом духе. — *Прим. ред.*

собно вселить в нас, наряду с сознанием ограниченности наших знаний, большую веру в будущее науки.

На каждом этапе развития человечества мы встречаемся с одной и той же тенденцией к преувеличению значения уже полученных результатов и с верой в то, что эти результаты являются «ключом к познанию всех тайн вселенной».

Получив какие-либо экспериментальные результаты, люди вполне закономерно пытаются как можно быстрее обобщить их и применить ко всем областям науки с целью расширения своей власти над материей.

Так создается ряд мистических учений *.

Когда на заре человечества люди узнали значение слова и графического изображения как средства для взаимного общения и убедились в том, что с помощью слов, знаков и изображений они получают власть над себе подобными, им и здесь представилась возможность обобщения. Им казалось, что аналогичным путем может быть обеспечена власть над всей живой и неживой природой. Таково было происхождение магии, которая пользуется словом и изображением, заклинанием и заговором.

В своей прекрасной книге «Золотая ветвь» Джемс Фрезер нарисовал нам яркую картину роли магии в первобытных «обществах» и ее глубокое влияние на первобытную историю человечества. Это была наука того времени. В настоящее время существует много малоразвитых народов, которые еще не порвали с примитивной мистикой, глубоко коренящейся в нашем подсознании.

Затем человечество открыло значение чисел и вытекающую из этого возможность предвидения.

Из арифметики путем поспешного обобщения вышли мистические учения пифагорейцев и еврейской каббалы. Считалось, что с помощью чисел можно познать мир и овладеть им. Значение числовых законов, управляющих вселенной, должно было обеспечить власть над миром. Несколько бесспорных фактов обрастают массой заблуждений. Развитие в Халдее примитивной астрономии, с помощью которой можно было предсказы-

---

* Правильно выступая против догматизации науки, против преувеличения и возведения в абсолют тех или иных научных положений, Ланжевен ошибочно ставит на одну доску такие ненаучные воззрения, как магия, каббала, астрология, с научными воззрениями механического естествознания XVII—XVIII вв. Он смешивает то и другое вместе и подводит их под своеобразно понимаемое им понятие «мистика». Нельзя не видеть надуманности, насильственности такого смешения.

Ланжевен также не раскрывает социальных корней догматизации и «мистификации» тех или иных представлений о мире. Эти мистификации не были просто результатом неких «поспешных обобщений», как односторонне пишет об этом Ланжевен. — *Прим. ред.*

вать затмения и вычислять движение небесных тел, дает начало астрологии, науке, предсказывающей будущее людей на основании тех же наблюдений, которые позволяли предсказать движение планет. Астрология до последнего времени играла значительную роль в решениях отдельных лиц и даже правительств.

Это была разновидность мистики, дальнейшая попытка обобщения на пути от известного к неизвестному. Позднее, открытие в Греции дедуктивного мышления в форме логики и геометрии породило надежду познать мир с помощью этого нового орудия, путем чистой дедукции.

Успехи, которые были обеспечены применением этого метода в анализе законов речи и в построении геометрии, привели к иллюзорному представлению о возможности достигнуть таким путем мудрости и всемогущества.

Систематизация греческой науки Аристотелем, впервые предпринявшим попытку классификации естественных наук, была началом новой мистики, которая под именем схоластики господствовала над миром до конца средних веков.

Наконец, в эпоху Возрождения приходят к признанию ведущей роли опыта и недостаточности теоретического подхода к фактам. Этот новый подход знаменуется бурным расцветом в области литературы, искусства и религии. Декарт подвергает сомнению авторитет схоластов; он снова выдвигает значение внутреннего опыта, в то время как Бекон подчеркивает роль опыта внешнего. Ньютон знаменует своим учением логическое завершение нового понимания мира, которое, в свою очередь, порождает новую мистику — мистику механицизма. Необычайный успех ньютоновской небесной механики дал физикам XVIII и даже начала XIX столетия надежду объяснить аналогичным путем все явления природы. Так родилась новая мистика, нашедшая выражение в словах Лапласа: «Укажите мне законы, управляющие взаимодействием между атомами, и я предскажу вам будущее вселенной». Влияние ее распространилось не только на физику, но также на философию и биологию.

Эта новая мистика механицизма должна была неизбежно вступить в конфликт с данными опыта. В середине XIX в. имеет место новая реакция, порожденная Фарадеем в науке об электричестве, а также термодинамикой и энергетикой в общей физике. Энергетика, только появившись на свет, тотчас же, путем все того же преждевременного обобщения, дает начало новой мистике, продержавшейся в течение почти 50 лет. Я помню, что около 1894 г. мне попалась статья Оствальда, представлявшая собой настоящий гимн в честь энергетики. Оствальд развивал в этой статье своего рода религию, разновидность монизма,

основанную на принципах термодинамики; причем в основу морали была положена основная аксиома: «Не принижайте энергии».

Фарадей заложил основы электромагнитной теории, развитой затем Максвеллом и Герцем. Двадцать лет назад, наблюдая, как эта теория завладевает оптикой с помощью электромагнитной теории света, а затем механикой через теорию относительности, можно было думать, что мы, наконец, близки к окончательному синтезу. Однако экспериментальные затруднения, которые я резюмирую здесь под именем «квантов», показали, как далеки мы еще на деле от этой вожделенной цели. Несмотря на все трудности и колебания, нельзя не видеть непрерывного движения вперед; каждый синтез, прежде чем уступить место следующему, объединяет и приводит в систему все возрастающее количество фактов. В этой координации внешне глубоко различных реальностей и заключается наша действительная и, повидимому, окончательная победа. Так, мы теперь знаем, что оптика представляет собой отдел электромагнетизма и что свет по своей природе аналогичен недавно открытым герцевским волнам, получившим в наши дни столь широкое распространение.

Таким образом, нам становится ясно, что в наших знаниях содержится много как живого, развивающегося, так и преходящего, а это, в свою очередь, может предостеречь нас от опасности догматизма, который, как все то, что уже закончено и мертво, заключает в себе что-то безнадежное.

К приведенным примерам я хотел бы прибавить ряд соображений несколько иного порядка. При переходе от известного к неизвестному легко не только преувеличить значение уже полученных результатов, но и дать им неправильное истолкование. Объяснить какое-нибудь явление — не значит ли это свести его к другим, которые мы считаем менее сложными? Так, свет мы объясняем с помощью герцевских волн потому, что лучше знаем их; нам известны все детали получения этих волн, между тем как роль атомов в световых явлениях представляет для нас еще почти неисследованную область.

Свойства газов (выражаемые законами Мариотта и Гей-Люссака) также становятся более понятными, если стать на точку зрения кинетической теории, объясняющей их движением молекул, и предположить, что теплота — это проявление движения и взаимостолкновения молекул; одним словом, если все свойства газов свести к механическим законам. Задача физики заключается, прежде всего, в координации внешне различных явлений и затем в объяснении некоторых из них, рассматриваемых как сложные, с помощью других, более простых. Здесь

решающее значение имеет правильный выбор тех явлений, которые в качестве простых должны служить для объяснения более сложных. На этом этапе очень легко принять за более простое то, что нам более привычно, смешать простое с привычным. Между тем эти понятия глубоко отличны одно от другого и, к несчастью, нередко даже противоположны. Привычные нам механические представления о «силе» и «массе» вместе с тем чрезвычайно сложны. Антропоморфизм наших представлений бессознательно связывает представление о силе с представлением об усилии, необходимом для приведения тела в движение. Однако не так просто установить, что скрывается в действительности под понятием «сила». Мистика механицизма кладет понятия о силе и массе в основу своего объяснения мира и представляет явления электричества как обусловленные силами, действующими на расстоянии между различными флюидами.. В настоящее время нам кажется более простым начать с другого конца и попытаться объяснить хотя бы некоторую часть механических явлений с помощью электрических представлений, более простых, но не столь очевидных и поэтому менее привычных.

То же самое наблюдается и при попытках объяснения явлений магнетизма, которые вначале базировались на экспериментальных данных, полученных в результате наблюдений над естественными и искусственными магнитами. Явления магнетизма объяснялись наличием «флюидов» и их взаимодействием на расстоянии. Теперь мы знаем, что этот вопрос гораздо сложнее, и только более углубленный анализ может открыть правильный путь к его разрешению. Оказалось, что свойства магнитов объясняются наличием в атомах подвижных электронов, взаимодействующих друг с другом и с окружающей средой, которые в своем простейшем аспекте были открыты совсем недавно под названием катодных лучей. Природа как будто нарочно являет нам действительность в ее самых сложных аспектах, и с нашей стороны требуется много усилий, чтобы высвободить более простые представления, с помощью которых мы воссоздаем картину мира.

Возьмем, например, свет. Основным свойством, приписываемым свету в учебниках физики, является то, что́ сначала бросается в глаза всякому наблюдателю, а именно: линейность его распространения. На этом свойстве света основывалась старая теория эмиссии, согласно которой свет рассматривался как поток бесконечно малых частиц, выбрасываемых источником и распространяющихся по прямой линии при условии отсутствия препятствий. Открытие явления интерференции и дифракции, когда свет, встречая на своем пути препятствия, перестает

распространяться прямолинейно и огибает эти препятствия, заставило отказаться от этой теории. Указанные аномалии были объяснены с помощью волновой теории. Подчиняясь общему закону, волновая теория породила свою мистику, приверженцы которой ожесточенно выступали как против электромагнитной, так и против квантовой теории света. В настоящее время ученые приходят к выводу, что истина лежит посредине, что каждая из этих теорий дает представление лишь об одном аспекте реальности и что полное понимание явления может быть получено только в результате синтеза. И в этом случае борьба между тезисом и антитезисом также должна привести к синтезу, включающему оба противоположных представления, но на более высокой ступени.

Таковы факты, с которыми нам приходится сталкиваться, приступая к изучению или преподаванию точных наук. Связанное с таким подходом представление о некоторой неопределенности и несовершенности не должно нас пугать; оно заключено в самой природе вещей, между тем как непрерывное развитие и все расширяющаяся область синтеза являются фактами, очевидность которых неоспорима. Преимущества исторического подхода в преподавании точных наук не исчерпываются изложенными мною соображениями педагогического и научного порядка. Влияние такого подхода на философию совершенно неоспоримо, ибо она в значительной степени также опирается на достижения науки. История, со своей стороны, также не может не учитывать влияния, оказываемого научными понятиями на развитие цивилизации и структуру обществ и государств. Греческая цивилизация и законодательство были проникнуты духом современной науки. В эпоху Возрождения освобождение умов и реформация явились реакцией против злоупотреблений схоластики и дедуктивной мистики. Роль Ньютона в социальной эволюции XVIII в. несомненна. В творчестве этого великого англичанина черпают свое вдохновение и образцы энциклопедисты, предшественники французской революции.

Признавая роль науки в деле освобождения человеческого сознания и утверждения прав человека, французская революция энергично пыталась ввести преподавание точных наук в систему общего обучения и заложить тем самым основы современного гуманизма, который, однако, до настоящего времени не получил еще окончательного признания. Именно революция создала прекрасную систему высших центральных школ, из которых вышло большинство крупнейших французских ученых XIX в.

В эпоху Консульства, Империи и Реставрации преподавание точных наук, подчиняясь общей политической реакции, было значительно урезано. В течение всего XIX в. и вплоть до настоя-

щего времени во Франции, так же как и в других странах, история идей не включается в школьные программы и не встречает признания, которого она заслуживает.

В 1852 г. экспериментальные науки снова включаются в школьные программы, но в чисто утилитарном виде. Создается впечатление, что правительства опасаются развития того духа критики, который сопутствует правильно понятому преподаванию научных дисциплин.

В настоящее время еще рано судить о том влиянии, которое может иметь преподавание, насыщенное научным духом, и в котором истории идей будет отведена более значительная роль. Однако нам кажется несомненным, что мы должны приветствовать все, что может создать у ребенка более точное представление о коллективном усилии и живой связи между прошлым и настоящим.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ *

После четырех прекрасных докладов, которые вам показали различные фазы развития теории относительности, не бесполезно отметить отдельные мысли, интересные с точки зрения синтеза, и подчеркнуть важность теории относительности не только для самой физики, но также и для философии, для ее связи с другими сторонами умственной деятельности и, в конечном счете, для теории познания, т. е. размышлений самого разума о его собственной деятельности.

Теория относительности появилась не внезапно, хотя обратное положение должно было бы казаться вполне вероятным.

Развитие ее представляло собой один из моментов эволюции физики, и она явилась в некотором смысле разрешением векового конфликта между концепцией моментального действия на расстоянии, что соответствует понятию абсолютного времени, и концепцией действия, передаваемого постепенно от частицы к частице, которая, в конце концов, восторжествовала.

Таким образом, теория относительности опирается на всю историю физики. Но, кроме того, эта теория является ее неотделимой составной частью, как звено, связывающее прошлое и будущее, и как необходимый для физиков инструмент, о чем вам доложил Луи де Бройль.

Эта теория является связующим звеном между прошлым и будущим потому, что она облегчила нам понимание всей совокупности известных экспериментальных фактов и позволила предвидеть новые явления.

В частности, она привела в порядок то, что мы знали наиболее точным образом.

По этому вопросу Бауэр доложил вам, что в оптике удалось достигнуть степени точности, равной 10^{-11}, — пример действительно поразительного совпадения между теорией и опытом.

И наконец, — что является наиболее полным критерием действительности любой теории, — теория относительности позво-

---

* Эта речь представляет собой общее заключение серии докладов и дискуссий, проведенных под руководством профессора Коллеж де Франс — Поля Ланжевена (1932 г.). — *Прим. ред.*

лила не только опередить опыт путем предвидения новых явлений (как вам это показал Дармуа), но и произвести построение новых теорий, как, например, волновой механики, появление которой без теории относительности было бы невозможно.

Успех теории относительности как средства представления о вселенной является в известном смысле прагматическим оправданием этой теории *.

Философский интерес рассматриваемой теории заключается в ясности, которую она проливает на самые основы познания и на весь эволюционирующий механизм человеческого мышления.

Бауэр показал вам, что развитие специальной теории относительности началось с критического анализа понятия времени **.

Этот анализ был обусловлен конфликтом между ньютоновской концепцией моментального действия на расстоянии и фарадеевской концепцией о передаче действия постепенно, от частицы к частице.

Столкновение этих двух точек зрения позволяет нам выразить существенные идеи, которые упираются в понятие времени: абсолютное время связано с возможностью моментального действия на расстоянии, а относительное время — с существованием действия, передаваемого постепенно, от частицы к частице.

Идея причинности навязывается нам констатацией закономерной последовательности явлений или, лучше сказать, течением «событий».

Если два события происходят в один и тот же момент и в одном и том же месте, это значит, что они, с пространственно-временной точки зрения, находятся в абсолютном совпадении. Все наблюдатели согласны с тем, что эти события происходят одновременно, а если одно из них зависит от другого, то и с тем, что они причинно взаимосвязаны.

Для того чтобы установить причинную связь между двумя событиями, разделенными в пространстве и во времени, мы должны заполнить интервал между ними цепью событий, соответственно находящихся в абсолютном совпадении. Эта цепь, например, может быть создана механическими действиями, переносимыми твердым телом.

---

* Ланжевен здесь использует крайне неудачную терминологию, позаимствованную из реакционной буржуазной философии. Он хочет сказать: оправданием теории относительности *на деле*. Прагматизм же здесь совсем не при чем. — *Прим. ред.*

** Но, конечно, нельзя упускать из виду того решающего обстоятельства, что этот «критический анализ понятия времени» не явился сам собой в уме размышляющего физика-теоретика, а был с необходимостью подготовлен предшествующим развитием в первую очередь экспериментальной физики. — *Прим. ред.*

В том случае, когда эта цепь образовывается светом, можно было бы сказать, что световой снаряд отправляется из источника в абсолютном совпадении с событием, являющимся причиной его движения, и прибудет в абсолютном совпадении с событием, являющимся его следствием. Вместо использования этой баллистической концепции света возможно применить концепцию волновую: в этом случае определенное возмущение будет передаваться от ближайших частиц к следующим по всей среде, и это возмущение соединит два события.

Ньютоновская концепция представлена в знаменитом законе тяготения и законах, созданных по его подобию (законы Кулона, Лапласа, Ампера). Событие, являющееся причиной, т. е. присутствие притягивающего тела в определенной точке, производит моментально на расстоянии событие, являющееся следствием, что выражается в изменении движения притягиваемого тела.

Сама форма этих законов устраняет понятие времени из их выражения. Эта возможность моментального действия позволяет определить одновременность событий на расстоянии совершенно однозначно, и возможные движения наблюдателей совершенно не принимаются во внимание при констатации причинности.

Если мы рассматриваем два события, разделенные пространственно и неодновременные, то их последовательность во времени имеет абсолютное значение, и то событие, которое является последующим, может рассматриваться как возбужденное предыдущим.

Перейдем теперь к гипотезе постепенного распространения. Если для различных наблюдателей мы предположим совпадение времен в различных точках, устанавливаемое посредством обмена световыми сигналами или сигналами герцевских волн, то порядок последовательности двух событий может быть обращен (если мы переходим от одной системы к другой). Следовательно, невозможно, чтобы между этими событиями могла существовать причинная связь.

Нетрудно показать, что последнее как раз и требует постепенного распространения самой причинной связи со скоростью, равной максимум скорости света. Причинная связь, таким образом, может существовать между этими двумя событиями в двух различных точках только в том случае, если второе событие произойдет после прибытия светового или герцевского сигнала, приходящего от первого события.

Таким образом, мы можем рассматривать две категории парных событий:

1) второе событие совершается после прибытия сигнала, испускаемого первым событием в момент, когда оно происходит;

оба эти события могут находиться в причинной связи друг с другом;

2) второе событие предшествует прибытию сигнала, испускаемого первым событием; в этом случае между этими событиями не может быть причинной связи.

Для второй категории событий совершенно безразлично, в какой последовательности видит их наблюдатель — в прямой или обратной, так как между ними не может существовать причинной связи. Следовательно, не будет логического противоречия в том, что мы станем наблюдать обратный порядок последовательности таких событий, если мы переменим систему координат.

Понятие «абсолютное время» было принято в ньютоновской механике именно потому, что в ней допускалось моментальное распространение причинности; и для теории относительности, в основе которой лежало оптическое время, очень трудно было освободиться от старых взглядов в тех случаях, когда не была ясно видна связь между понятиями времени и концепциями моментального дальнодействия или же постепенно распространяющегося действия.

В историю физики эта идея близкодействия проникала постепенно. В области электромагнетизма она выражена в идеях Фарадея. Максвелл, переводя эти идеи на язык математики, был удивлен, увидев, что применение концепции близкодействия приводит к уравнению распространения электромагнитных волн, скорость которых в точности соответствует скорости света. Наконец, экспериментальное подтверждение Герцем расчетов Максвелла, которое приводит к допущению электромагнитной природы света, было решающим моментом в истории науки. Эта электромагнитная теория света осветила всю физическую оптику и заменила собой теорию мирового эфира Френеля.

Но что осталось незамеченным до Лоренца и Эйнштейна, так это то, что электромагнитная теория находится в противоречии с ньютоновской механикой.

Понадобился опыт Майкельсона и другие аналогичные попытки, чтобы определить тот глубокий конфликт, который существовал в самих идеях еще до того, как он был обнаружен опытным путем.

С теоретической точки зрения, это противоречие может быть обнаружено, независимо от всех опытных путей, только одним способом. Законы классической механики являются идентичными для наблюдателей, находящихся в равномерном движении по отношению друг к другу, и это подтверждается тем фактом, что уравнения сохраняют свою форму, когда к ним применяют преобразования Галилея. Напротив, Лоренц заметил, что уравнения электромагнетизма оказываются инвариантными при со-

вершенно другом изменении переменных (группа преобразований Лоренца). Даже одного этого факта было бы достаточно для того, чтобы показать глубокое противоречие, существующее между классической механикой и электромагнетизмом; это противоречие уже наперед устраняло всякую возможность механического объяснения электромагнетизма, так как из уравнений классической механики, инвариантных при преобразованиях группы Галилея, нельзя вывести уравнений, которые, подобно электромагнитным, будут инвариантны при преобразованиях группы Лоренца. Поскольку, с другой стороны, уравнения электромагнетизма были подтверждены со значительно большей точностью, чем уравнения механики, то последние пришлось оставить.

Большой заслугой Эйнштейна было то, что он показал, что примирение этих двух точек зрения требует глубокого видоизменения понятия времени на основе идеи действия, распространяющегося на расстоянии. Он сумел показать, что если соответствию времени для мест, разделенных расстоянием, дать экспериментальное определение, то, в конце концов, неизбежно приходят к группе преобразований Лоренца, требуемой электромагнитной теорией.

Когда поняли, что идеи, вытекающие из причинности, в конце концов, упираются в понятие времени, то, естественно, пришлось отбросить абсолютную концепцию одновременности и принять тот результат, с первого взгляда парадоксальный, что два наблюдателя, находящиеся в движении, могут наблюдать два события, следующие друг за другом, в одном порядке или в порядке прямо противоположном; с другой стороны, последовательность двух событий, находящихся в причинной связи, не может быть обращена. Кроме того, если в прежних воззрениях было принято, что совпадение событий в пространстве без совпадения их во времени имеет только относительный характер, то совпадению во времени без совпадения в пространстве придавался абсолютный характер. Объединение теорией относительности понятий времени и пространства ввело в физику ту гармонию, которая до этого в ней не существовала.

Плодотворность идей, положенных в основание специальной теории относительности, проявилась в особенности в том, что принцип относительности, соединенный с общими принципами физики, привел к новой динамике, находящейся в большем согласии с фактами, чем динамика Ньютона.

Френсис Перрен напомнил вам, что абсолютная масса является дочерью абсолютного времени. Если же, наоборот, обратиться к новой кинематике, мы получим новую динамику, в которой масса является функцией скорости и которая, с более общей точки зрения, вводит исключительное упрощение, утверждая

тождество массы и энергии или — что то же самое — инерцию энергии.

Новая механика заменила старую, представлявшую собой первое приближение к действительности, так же как эйнштейновская кинематика заменила собой кинематику Галилея, являвшуюся приближением, верным при малых скоростях. При помощи электронов оказалось возможным осуществить достаточно большие скорости, которые позволили проверить уравнения новой динамики.

Опыты, произведенные с частицами, движущимися со скоростями, близкими к скорости света, в точности подтвердили предвидения релятивистской динамики.

Переходя к самой теории света, можно сказать, что новая динамика позволяет устранить тот конфликт, который существовал между волновой и корпускулярной концепциями. Можно надеяться, что благодаря новой динамике из этих двух теорий, в конце концов, будет построен синтез, которого требует современная волновая механика.

Все эти результаты вытекают из понятия действия, передаваемого постепенно. Отказаться от привычных понятий было очень трудно, но смелость и дерзание оказались вознагражденными той плодотворностью, которую показала новая теория.

Та же самая связь идей дала Эйнштейну толчок для построения общей теории относительности. Наши понятия пространства и времени представляют собой частный случай нумерирования событий *. Вселенная рассматривается как имеющая четыре измерения, и каждое событие требует употребления четырех координат. Но эта нумерация может производиться самыми различными способами, относя события к различным системам координат.

Например, свободно падающий лифт является негалилеевой системой, к которой можно относить события. Далее, мы приходим к тому, что придуманный Эйнштейном «моллюск» **, сорт деформируемого желе, в котором координатами оказались бы окрашенные нити, мог бы еще служить для целей нумерирования событий, потому что в нем сохраняют свое значение абсолютные совпадения.

---

* Понятия пространства и времени являются не способом или «частным случаем нумерирования событий», а отображением объективных, вне и независимо от сознания существующих пространства и времени — форм бытия материи. Здесь Ланжевен делает уступку модной среди буржуазных физиков субъективистской терминологии. Это — ляпсус лингве Ланжевена. — *Прим. ред.*

** О «моллюске» Эйнштейна см. в его работе «Принцип относительности». — *Прим. ред.*

Создание общей теории относительности для Эйнштейна стало возможным только тогда, когда он ясно понял, что все законы физики лишь координируют наши ощущения и что эти ощущения представляют собой результаты абсолютных совпадений *.

Все наши законы являются только утверждением цепной зависимости абсолютных совпадений, и поскольку последние независимы от отдельных систем координат, то законы физики вполне возможно сформулировать независимо от этих систем.

Создавая аналитическую геометрию, Декарт видел все то значение, которое имеет введение координат. Но до него геометры рассуждали непосредственно на фигурах и создали абсолютную геометрию, где свойства фигур определялись независимо от способа координации точек или линий. На языке аналитической геометрии Декарта координаты, принимаемые для того, чтобы описать фигуру, меняются с системой осей, хотя законы или свойства, для доказательства которых они служат, независимы от выбора этой системы. Нечто подобное абсолютной геометрии можно создать и в области физики. Абсолютная физика говорила бы о цепных зависимостях абсолютных совпадений и не ссылалась бы ни на какую систему координат.

Подлинно гениальным делом Эйнштейна было повторение в отношении пространства эквивалента той критики, которая была проделана в отношении времени. Как и в отношении значения понятия одновременности на расстоянии, здесь также потребовалось обратиться к более глубокому значению понятия координат. Эта критика была облегчена предыдущими исследованиями по логическому содержанию старой геометрии. С этой точки зрения, основателями современной концепции относительности являются также Лобачевский, Гаусс, Больяи и др., которые показали, что могут быть построены геометрии, независимые от постулатов Эвклида.

Эти геометрии были замечательно разработаны Риманом, а Анри Пуанкаре показал, что они выражают те же факты, что и эвклидова геометрия, только другим языком. Риман уже предчувствовал, что геометрию не следовало рассматривать независимо от физики **. Вместо эвклидова пространства, образующего жесткую рамку, свойства которой независимы от ее содержания,

* Законы физики не «координируют наши ощущения», а выражают объективные взаимосвязи и взаимообусловленность явлений материального мира. Ланжевен здесь отступает от материалистического представления о законах науки. Это ошибочное высказывание Ланжевена стоит в противоречии с материалистической основой его убеждений, и это отступление от материализма носит у него случайный характер. — *Прим. ред.*

** В действительности задолго до Римана тесную и глубокую взаимосвязь геометрии и физики раскрыл гениальный русский математик Н. И. Лобачевский. — *Прим. ред.*

следует иметь в виду геометрию, определяемую реальным содержимым вселенной.

Пуанкаре занял позицию в известном смысле эклектическую: с его точки зрения, между логической ценностью различных геометрий нет никакой разницы; можно принимать любую из них с соответствующими изменениями физических законов при переходе от одной к другой. Он не предусмотрел того, что, пользуясь римановой геометрией, в которой принимается зависимость кривизны пространства-времени от его содержимого, Эйнштейну удалось, наконец, разъяснить старую тайну тяготения. Таким образом, углубленная критика понятия времени дала возможность внести ясность в механику, а углубленная критика понятия пространства — раскрыть тайну тяготения. Включение геометрии в физику дало возможность непосредственно понять тождество массы инерции и массы тяготения.

Но с критической частью теории относительности, приведшей к отказу от абсолютного времени и от эвклидова пространства, тесно связана конструктивная часть, которая приводит к синтезу пространства-времени.

Минковский показал, что объединение пространства и времени приводит к новому абсолюту, пространство-время которого относительно какого-либо наблюдателя представляет собой только частичную перспективу. Различные наблюдатели, таким образом, отличаются друг от друга несовпадением их пространства и их времени.

Сила синтеза теории относительности проявляет себя во всех областях. Доклады Бауэра и Ф. Перрена показали, что ученые были вынуждены объединить, — в качестве составляющих одного и того же тензора, — элементы, которые до сих пор считались различными: энергию и количество движения, являющиеся аспектами временнòго и пространственного значения одного тензора вселенной — импульса. Таким же образом электрические и магнитные поля были сгруппированы в электромагнитном тензоре из шести составляющих. Все это подготовляет почву для синтеза корпускулярной и волновой концепции света.

Специальная теория относительности перевернула иерархию наук Огюста Конта. Механика перестала быть тем образом, следуя которому должно строиться физическое объяснение. Напротив, ограниченная относительность включила механику в физику, сделав из нее специальную главу физики, которая рассматривает движение материи. Переставая быть рациональной наукой и прототипом, который должен быть базой для объяснения других наук, механика, наоборот, представляется нам наиболее сложной наукой, последней в порядке теоретического объяснения. Разве весь современный кризис не обусловлен тем

фактом, что на внутриатомную область хотели экстраполировать понятие материальной точки из рациональной механики?

Дармуа показал в своем докладе, с какими трудностями сопряжено установление законов движения тела; эта проблема может быть разрешена только в частичном случае, когда бесконечно малая масса рассматривается в силовом поле значительной массы.

Затруднение становится еще более острым для второй формы общей теории относительности, введенной Эйнштейном. Новый результат, полученный до сего времени, обнимает совокупность общих законов, управляющих электромагнитными и гравитационными полями, но мы не знаем, как представить материю и как она себя будет вести в этом обобщенном поле.

По мере того, как разворачивается здание нашего представления, мы видим, что идеи, ранее казавшиеся нам наиболее простыми, в действительности являются значительно более сложными. Этот факт прекрасно объясняется, если заметить основную разницу, существующую между простым и привычным.

Объяснение должно привести неизвестное к известному, причем оно, по необходимости, основывается сначала на том, что является привычным. Поскольку механические свойства наиболее непосредственно оказывают влияние на наши чувства, то вполне естественно, что первые попытки объяснения мира, опиравшиеся на непосредственные данные наших чувств, были основаны на механических понятиях. Значительный успех этого способа объяснения в небесной механике в свою очередь неизбежно должен был привести к попытке распространить его на всю науку. Затем появился электромагнетизм; в физике произошел полный переворот, в результате чего идеи наших предков перестали соответствовать современному представлению о мире.

Этот переворот, происходящий на наших глазах, является фундаментальным фактом физики. Кажется, что природа представляется нам сперва всегда в наиболее сложной своей форме. Это основывается на том, что научное исследование по необходимости опирается прежде всего на поверхностные данные опыта наших предшественников, которые в последующем, по мере того как наши средства исследования становятся все более уточненными, оказываются чрезвычайно недостаточными.

В общем, однако, получается, что понятия, прежде казавшиеся наиболее фундаментальными и наиболее необходимыми, в конце концов отбрасываются как не могущие быть основанием для объяснений.

Так, в оптике — прямолинейное распространение света, в электричестве — притяжение легких тел, в магнетизме — свойства железных магнитов рассматривались сначала как простые, потому что они были привычными. В настоящее время эти свой-

ства представляются нам в качестве наиболее сложных вопросов этих трех областей физики. Точно так же обстоит дело и в отношении объема нашей науки, если даже, в противоположность тому, что думал Огюст Конт, механика окажется в последнем ряду физики будущего.

Общая теория относительности произвела в отношении пространства ту же самую трансформацию, которую теория ограниченной относительности произвела в отношении времени. В натуральной геометрии Эйнштейна, эффективно выражающей пространственные свойства материи, геометрические законы зависят от всей материи, находящейся во вселенной. Перемещение в сторону красной части спектра лучей, испускаемых вблизи большой притягивающей массы (например, Солнца), экспериментально доказывает расширение времени в присутствии материи. Современный кризис теории тесно связан (под другим аспектом) со слишком абсолютным суждением о том, что нас окружает.

Основой встречаемых нами затруднений является концепция индивидуальности элементарных частиц. Мы захотели ввести во внутриатомную динамику достаточно поверхностное понятие «индивидуального», — и мы уже сейчас видим, что у нас нет оснований говорить о движениях индивидуальных частиц в таком малом масштабе. Получается, что связь, существующая между всеми элементами вселенной, должна отразиться на самой структуре науки.

Процесс мышления, обнаруживаемый развитием концепции относительности, является, по своему существу, эволюционным процессом, назначение которого состоит в том, чтобы создавать новые понятия, не придавая при этом абсолютного значения понятиям, исходящим от первоначального и поверхностного контакта с природой.

В области ограниченной относительности определения, производимые наблюдателями, находящимися в движении, должны оказываться как будто противоречивыми. Так, например, для различных групп наблюдателей, находящихся в относительном движении, тождественные законы могли бы казаться разными. При помощи своего рода гегелевской диалектики специальная теория относительности устранила эти противоречия, построив синтез, в котором каждый из фактов, на первый взгляд противоположных, в действительности представляет собой только один из аспектов целого. Интересно отметить, что этот метод работы не является новым. Само понятие «объекта» в действительности чрезвычайно сложно; оно представляет собой синтез всех ощущений, осязательных и зрительных, на первый взгляд противоречащих друг другу. Когда мы «представляем» себе какой-нибудь объект, мы реализуем синтез всех наших возможных ощущений, касающихся этого объекта.

Относительность понятия объекта лежит в основе всего нашего языка и нашей возможности общаться друг с другом. Так же обстоит дело в отношении теории относительности в физике. Вселенная, с точки зрения разных наблюдателей, казалась совершенно различной; противоречия исчезли в результате создания нового представления об объекте. Наша физика сделалась геометрией вселенной. Так же, как чистая геометрия является наукой о фигурах, физика представляет собой науку о всем комплексе взаимосвязанных событий.

Этот процесс, представляющий собой продолжение развития различных отраслей познания, является только одним из аспектов необходимого усилия по приспособлению мышления к фактам, усилия, которое началось с момента возникновения жизни на земле. Научное усилие не является ни произвольным, ни изолированным. Наука сама по себе — это только здравый смысл, немного более продвинувшийся вперед. Научная работа протекает так же, как и любая другая человеческая работа. Она не может продолжаться иначе, как сохраняя контакт со всеми источниками и ресурсами человеческого коллектива. Отсюда с необходимостью вытекает, что нельзя допускать такого положения, при котором результаты наших усилий оказались бы в распоряжении лишь небольшого количества мыслящих умов. То, что сегодня известно большинству людей, пятьдесят лет назад было привилегией только небольшого количества ученых; и этот процесс будет продолжаться без конца, так как научные познания являются одним из моментов коллективного приспособления мышления к фактам.

АТОМЫ И КОРПУСКУЛЫ *

Я чрезвычайно польщен честью, которую вы оказали мне, предложив выступить с докладом на открытии настоящей конференции, посвященной празднованию двадцатипятилетия Физико-химического общества.

Боюсь, что мне придется довольно долго задержать ваше внимание, однако надеюсь, что вы меня простите, когда я изложу вам свои соображения, которые, как мне кажется, было бы полезно предпослать докладам, предлагаемым здесь вашему вниманию. Все эти доклады будут посвящены рассмотрению наиболее значительных достижений физической химии в области электронной и электролитической проводимости, области, в которой корпускулярная теория, упомянутая предыдущим оратором и обусловившая развитие физической химии, играет особенно важную роль — будь то движение электронов в металле, движение ионов в электролитах или их скопление в виде переходных двойных слоев.

Несмотря на то, что успехи корпускулярной теории в течение последних тридцати лет являются достаточно убедительным доказательством в ее пользу, я все же считаю не лишним раскрыть перед вами действительное состояние данного вопроса и показать те трудности, которые влечет за собой принятие этой теории, — трудности, связанные, с одной стороны, с необычайно быстрым накоплением экспериментального материала, нелегко укладывающегося в рамки привычных нам представлений, а с другой — с противоречиями, по крайней мере кажущимися, между этими теоретическими представлениями и данными опыта. В нашем стремлении к познанию мы, не пренебрегая практическими соображениями и используя все то, что оказалось верным, не должны закрывать глаза на имеющиеся трудности. Надеюсь, что после того, как я очерчу вам вкратце весь предшествующий путь развития корпускулярной теории, вам станет ясно, насколько велики эти трудности и насколько тесно они

* Доклад, прочитанный проф. Ланжевеном на открытии Международного съезда по физической химии 16 октября 1933 г.; публикуется с некоторыми сокращениями. — *Прим. ред.*

связаны с самими условиями нашего познания и с необходимостью пользования для выражения новых фактов старыми представлениями, выработанными предшествующим опытом и не всегда адэкватно выражающими новую реальность или новый аспект этой реальности. Именно такое положение мы имеем в настоящее время. Чтобы вы могли составить себе возможно более наглядное представление о современном положении этой проблемы, я сначала изложу вам вкратце экспериментальную сторону вопроса, а затем перейду к изложению теоретической части, более сложной и, с точки зрения будущего развития науки, несомненно, наиболее плодотворной.

Вы знаете (в своем докладе об этом напоминал вам и проф. Перрен), что с течением времени наша уверенность в правильности атомной, или корпускулярной, гипотезы непрерывно возрастала. Эта теория, являющаяся развитием представлений греческих философов о том, что окружающая нас материя состоит из чрезвычайно твердых частиц, подобных привычным нам частицам, но бесконечно меньших по величине, представляющих собой предел деления вещества, получила особенно большое значение в последние два столетия, в частности, в связи с развитием химии. В своем докладе Перрен утверждает, что химия вправе претендовать на область прерывности материи; и действительно, заслуга внедрения в наше сознание представления о прерывности вещества принадлежит химии, так как прерывность является характерным свойством химических соединений.

Оказалось, что каждый из химических элементов должен рассматриваться как состоящий из совершенно одинаковых атомов. С тех пор, как этим вопросом занялись физики, стало точно известно, что каждый элемент представляет собой смесь изотопов, из которых каждый состоит из группы идентичных между собою атомов. Атомы, как было открыто тридцать с небольшим лет назад, в свою очередь состоят из наэлектризованных частиц и, соединяясь по законам прерывности, образуют молекулы.

Естественно, что химия может дать нам представление лишь об относительной массе атомов. Она предполагает, что в том, что мы называем грамм-атомом элементарного вещества или изотопа, грамм-молекулой какого-либо соединения или грамм-ионом продукта электролитического разложения, содержится всегда одно и то же количество N частиц — атомов, молекул или ионов, и что массы, будь то атомные, молекулярные или ионные, с которыми оперирует химия, соответствуют массам, численно равным N массам каждой разновидности атомов, молекул или ионов.

Эти массы, определяемые химией, дают нам *относительные значения* индивидуальных масс атомов или молекул, но химия

не дает нам их абсолютных значений, не дает величины числа N.

Первые сведения относительно числа N были получены физиками с помощью так называемых статистических методов, путем применения кинетической теории главным образом к изучению газообразных веществ. Эта теория позволила определить число N путем исследования того, что мы называем флюктуациями, т. е. обнаруженных на опыте отклонений от принципа Карно, как, например, броуновское движение, голубой цвет неба и другие явления подобного рода.

Полученные таким образом данные оказались поразительно согласными между собой, однако до тех пор, пока для их измерения не было использовано электричество, они были недостаточно точны. Лишь с помощью науки об электричестве, наиболее «физической», какую только можно себе представить, оказалось возможным впервые ввести настоящую точность в измерение атомных и молекулярных величин. В частности, великолепные опыты Таунсенда и Дж. Дж. Томсона, повторенные Милликеном, доказали зернистое строение электрических зарядов и дали возможность измерить величину зерен положительного и отрицательного электричества с точностью, доходящей в настоящее время до одной тысячной.

Вы знаете, что это открытие стало возможным благодаря изучению электропроводности, приобретаемой газами под действием, например, лучей Рентгена. Это явление объясняется по аналогии с проводимостью металлов или электролитов. Допускают, что прохождение рентгеновских лучей через газ вызывает частичную диссоциацию молекул и образование наэлектризованных частиц или ионов. Если в газе, служащем проводником электрического тока, тем или иным способом вызвать образование капелек жидкости, то последние в свою очередь оказываются наэлектризованными и могут служить в качестве пробных тел для изучения явления проводимости, подобно электрическому маятнику в макроскопических исследованиях. Заряд каждой такой капельки может быть измерен, подобно заряду любого наэлектризованного тела.

Для получения наэлектризованных капелек может быть использована конденсация водяных паров, перенасыщенных в результате расширения, как в камере Вильсона; водяные капельки могут быть заменены капельками масла, распыляемого в газе, как это было проделано Милликеном. Последнее дает возможность избегнуть неудобств, связанных с испарением воды и колебаниями массы капелек, вследствие чего нарушалось постоянство условий опыта. Ввиду того, что капельки воды конденсируются на ионах, которые, как предполагается, присутствуют в газе, или потому, что масляная капелька притягивает

к себе один из таких ионов и вследствие этого получает электрический заряд, все капельки оказываются наэлектризованными; причем в случае не слишком значительного расширения газа, перенасыщенного водяным паром, заряд всех капелек имеет одинаковый знак; в противном случае знаки различны. Оказывается, что заряды всех капелек одинаковы по абсолютной величине. Иногда их заряд в два или три раза превосходит то, что мы называем «элементарным зарядом». Благодаря точным измерениям Милликена в настоящее время величина этого заряда известна с точностью до тысячной — она равна $4{,}774 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц. Все электрические заряды являются целыми кратными — обычно очень простыми, положительными или отрицательными, — этой величины. Заряды макроскопических наэлектризованных тел превосходят ее в огромное количество раз.

Зная законы электролиза, мы можем вывести значение N из величины элементарного заряда, так как каждый моновалентный грамм-ион, состоящий из N ионов, будет иметь заряд, равный заряду одновалентного иона, умноженному на N.

Однако мы имеем все основания, и притом экспериментальные, полагать, что заряд моновалентного электролитического иона в точности равняется элементарному заряду, о котором мы только что говорили; но так как количество электричества, переносимое одним моновалентным грамм-ионом, равно числу Фарадея * — величине, которая известна с точностью до одной стотысячной, тогда как величина элементарного заряда известна с точностью до тысячной, то выходит, что число Авогадро N может быть определено с точностью до тысячной. Разделив число Фарадея на величину элементарного заряда, получаем для N величину: $6{,}06 \cdot 10^{23}$. Из значения N могут быть выведены массы отдельных атомов и молекул и вообще все атомные и молекулярные значения, размеры и пр.

Следующим шагом на этом пути явилось более полное установление природы электрической частицы, ставшее возможным благодаря открытию катодных частиц, или отрицательных электронов, испускаемых катодом в круксовых трубках под действием бомбардировки положительными лучами или получаемых в так называемом фотоэффекте, когда действием света вызываются из вещества отрицательные заряды. В термоионных явлениях отрицательные заряды испускаются накаленными металлическими нитями.

Изучение этих различных видов эмиссии позволило Дж. Дж. Томсону определить отношение между зарядом и массой частиц, а также скорость последних, т. е. отношение между заря-

* То есть $96 \cdot 490 \pm 10$ кулонов.

дом и массой, которое в классической механике рассматривается независимым от скорости и, как показала теория относительности, является в действительности убывающей функцией скорости, согласно закону, правильность которого была подтверждена экспериментально.

Равным образом было экспериментально доказано, что при малых скоростях величина этого отношения одинакова для всех случаев эмиссии отрицательных зарядов, будь то катодная, фотоэлектрическая, термоионная эмиссия и пр. Кроме того, оказалось, что все эти различные виды эмиссии состоят из частиц, несущих каждая один элементарный заряд. Поэтому, зная отношение между зарядом и массой, можно вычислить массу, всегда одну и ту же, каждой из этих частиц, или отрицательных электронов.

При малых скоростях эта масса имеет величину m_0, равную $0{,}9 \cdot 10^{-27}$ *г*, в то время как масса атома водорода, выведенная из числа N, равна $1{,}6 \cdot 10^{-24}$ *г*, и, следовательно, последняя приблизительно в 1800 раз больше массы отрицательного электрона.

Тот факт, что обычный свет или же рентгеновские лучи, также представляющие собой световые колебания, но более высокой частоты, вырывают отрицательные заряды или отрицательные электроны из самых разнообразных веществ, позволил вывести заключение, что отрицательные электроны являются неотъемлемой составной частью материи. Так как по своей величине электроны значительно меньше самых легких атомов, атомов водорода, то естественно было предположить, что они являются составной частью всех атомов.

В течение последних десятилетий развитие экспериментальной физики шло параллельно и в самом тесном взаимодействии с развитием теории, взаимодействии, которое, надо надеяться, будет продолжаться и впредь. Правда, в настоящий момент, в связи с недавними открытиями нейтрона и положительного электрона, опытная физика несколько обогнала теорию, однако последняя также не дремлет, и теоретики, несомненно, постараются приспособить свои представления к новым данным.

В то время как опыты Дж. Дж. Томсона показали, что катодная частица, или отрицательный электрон, обладает определенной массой и определенным электрическим зарядом, электромагнитная теория в лице Лоренца и его продолжателей пришла к тем же представлениям о материи как состоящей из наэлектризованных частиц и, в частности, объяснила с этой точки зрения так называемый эффект Зеемана *. Это явление в

* То есть явление расщепления спектральных линий света, испускаемого атомом, под влиянием магнитного поля. — *Прим. ред.*

его простейшей форме давало также возможность получить отношение между зарядом и массой электрона, которому приписывали решающую роль в образовании спектральной линии, разложенной Зееманом действием магнитного поля. Оказалось, что величина этого отношения всегда одинакова. Таким образом, наличие электрона во всех атомах доказано с полной очевидностью.

Вы знаете также, что необычайные успехи спектроскопии, последовавшие вслед за открытием Зеемана, показали, что так называемое явление Зеемана значительно сложнее, чем представляли себе Лоренц и его ученики, и что для его объяснения необходимо предположить, что отрицательный электрон обладает не только электрическим зарядом, но также и магнитным моментом, или *спином,* как мы теперь выражаемся, пользуясь английским термином. Это дополняло наше представление об электроне, которое в известной степени соответствует представлениям Демокрита. Экстраполируя наши макроскопические образы на бесконечно малое, мы воображали себе электрон в виде бесконечно маленького заряженного шарика или наэлектризованной вакуоли в эфире. Следствия, вытекающие из этого представления, были развиты мною в одной из моих работ того периода.

Открытие спина привело к предположению, что этот заряженный шарик вращается вокруг своей оси, создавая таким образом присущий электрону магнитный момент. Представление о структуре электрона оказалось связанным со значительными затруднениями. В частности, ввиду того, что составные части заряда электрона, распределенные на его поверхности и, возможно в его объеме, должны взаимно отталкиваться, необходимо постулировать наличие сил, способных уравновесить это взаимное отталкивание и обеспечить целостность электрона. Все же, несмотря на все его несовершенства, электрон мыслился в качестве вполне реального индивидуального объекта, ничем не отличавшегося от других знакомых нам объектов. Таково было развитие всех теорий в тот период.

Эта мысль была выражена Лоренцем на Сольвейевском конгрессе 1927 г. в Брюсселе, на котором выявились с полной очевидностью трудности, связанные с введением в теорию квантов привычных представлений о корпускулярном строении материи. «Для меня, — сказал он, — электрон является частицей, которая в каждый данный момент находится в определенной точке пространства; и если я воображаю, что эта частица в следующий момент будет находиться в другой точке, то я должен представить себе ее траекторию в виде линии в пространстве. Если же я предполагаю, что электрон встречает на своем пути атом, в который он проникает и который покидает после ряда «при-

ключений», то я в этом случае составляю себе известную гипотезу, согласно которой данный электрон сохраняет всю свою индивидуальность, т. е. воображаю себе линию, по которой данный электрон проходит сквозь атом. Мне хотелось бы сохранить этот прежний научный идеал — описывать все происходящее в мире при помощи ясных образов».

Таково было положение вещей. И эта оказавшаяся столь плодотворной теория, основанная на вере в существование индивидуальных частиц, получила, казалось, окончательное подтверждение благодаря замечательным опытам Вильсона, которые с полным правом могут быть названы самыми прекрасными опытами в мире. Используя конденсацию водяного пара, перенасыщенного вследствие расширения в проводящем газе, Вильсон показал нам наглядно те ионы, а также траектории заряженных частиц — электронов, которые мы раньше «видели» лишь в воображении.

Теперь я продемонстрирую вам несколько фотографических снимков, так как, напоминая вам о прошлом, я хочу в первую очередь представить вашему вниманию все аргументы, говорящие в пользу корпускулярного представления о материи.

Трудно найти более поразительные и живые доказательства, чем те, которые были получены с помощью опытов Вильсона; к тому же этот метод вообще оказался удивительно плодотворным, и мы обязаны ему многими первостепенными открытиями в области атомной и корпускулярной физики.

Рис. 11 воспроизводит снимок, полученный при фотографировании внезапного расширения воздуха, насыщенного водяным паром, через который пропускались почти монохроматические лучи Рентгена, так называемое K-излучение серебра. При прохождении через воздух камеры, лучи сообщают ему электропроводность, благодаря чему, при внезапном расширении, перенасыщенные пары воды конденсируются на ионах и образуют те капельки, которые вы видите на снимке, причем эти капельки располагаются в виде более или менее изогнутых нитей.

Такое строение тумана с первого взгляда кажется удивительным. На самом же деле оно объясняется очень просто: ионизация газа рентгеновскими лучами и образование большой части ионов происходит не непосредственно.

Непосредственное воздействие их на газ выражается в виде того фотоэлектрического эффекта, о котором я упоминал выше. Действуя на некоторые молекулы, K-лучи серебра вырывают с их поверхности отрицательные электроны и толкают их с огромной силой через газ. Пролетая газ, эта частица встречает на своем пути молекулы, воздействует на заключенные в них электроны и вырывает некоторые из них. Выброшенные со своих мест электроны дают начало отрицательным электронам в газе, а

молекулы, ставшие положительно заряженными вследствие потери электрона, превращаются в положительные ионы.

На рис. 11 ясно видно, что большинство капелек соединено попарно, вследствие конденсации пара на двух ионах — положительном и отрицательном, получившихся в результате ионизации одной молекулы.

На этом же рисунке мы видим отдельный отрицательный электрон, который обнаруживается при помощи следа траектории его движения в газе, начинающейся от молекулы, от которой он был оторван под действием излучения и энергия которого постепенно убывает в результате ионизирующих столкновений с многочисленными молекулами, встречаемыми им на своем пути. Этот прекрасный снимок, сделанный собственноручно Вильсоном, содержит еще одно чрезвычайно ценное указание: следы электронов представляют собой изогнутые линии, причем нередко бывает, что они изогнуты под углом. Это объясняется тем, что электроны, вырванные под действием излучения, движутся с не очень большой скоростью. При встрече с другими электронами их движение замедляется и отклоняется в сторону, траектория искривляется, и электрон в конце концов останавливается. Останавливаясь, он обычно образует небольшой пакет ионов, а следовательно, и водяных капелек. Кроме того, прежде чем окончательно остановиться, замедленный электрон крутится на одном месте.

Очень интересно также и то, что все три траектории, хотя по форме они и во многом различаются между собой, имеют приблизительно одинаковую длину, что в данном случае служит подтверждением основного закона, которому подчиняются все фотоэлектрические явления, а именно: все электроны, вырванные из одного и того же вещества под действием монохроматического излучения, обладают одинаковой скоростью. Другими словами, поглощение световой энергии, необходимой для того, чтобы вырвать и выбросить электрон, в случае излучения одинаковой частоты совершается всегда одинаковыми порциями, равными кванту света Планка. Следовательно, энергия, сообщаемая электрону светом, вызывающим фотоэффект, определяется частотой излучения.

Таким образом, оказывается установленным одно важное обстоятельство. Если взять излучение данной частоты, например лучи Рентгена, о которых речь шла выше, то количество энергии, получаемое каждым фотоэлектроном, будет совершенно определенно и пропорционально частоте излучения с коэфициентом, который носит название константы h Планка и величина которого может быть получена непосредственно из исследования фотоэлектрических явлений. Эта величина оказалась равной $6{,}55 \cdot 10^{-27}$ в единицах CGS.

Мы видим, что из одного опыта может быть сделано несколько очень важных выводов.

Вы знаете, что для объяснения фотоэлектрического эффекта необходимо предположить, что поглощение веществом излучения с частотой ν совершается отдельными квантами. Вместе с тем, как показал Планк, для объяснения спектрального состава излучения, находящегося в термическом равновесии с веществом при данной температуре, следует также предположить, что и эмиссия излучения веществом всегда совершается квантами энергии, равными $h\nu$.

Эйнштейн показал, что необходимо равным образом допустить, что эти кванты энергии соответствуют структуре самого излучения и что каждый квант переносит со скоростью света вместе с энергией, сконцентрированной на небольшой области пространства, также и соответствующее количество движения.

Рассмотренная нами фотография, кажется, вполне подтверждает представление о зернистом строении излучения, т. е. о существовании фотона, как мы его теперь называем.

Действительно, там, где появляется фотоэлектрон, отдельная молекула, которую ничто не отличает от остальных молекул газа, является объектом совершенно исключительного воздействия со стороны излучения. Вы видели, что количество этих фотоэффектов очень незначительно. Молекула поглощает целый квант энергии, в то время как соседние молекулы оказываются никак не затронутыми этим событием.

Это наводит на мысль, что излучение ведет себя так, как если бы оно было составлено из отдельных частиц энергии, которые в результате явления, аналогичного соударению, сталкиваются с молекулами и захватываются ими, причем энергия расходуется сперва на вырывание электрона, а затем на сообщение последнему кинетической энергии, с которой электрон пролетает через газ, ионизируя его на своем пути.

Таким образом, корпускулярное представление может быть распространено также на световые явления.

Корпускулярная концепция света нашла дальнейшее подтверждение в открытии так называемого эффекта Комптона. Для объяснения некоторых явлений смещения полос в рентгеновских спектрах американский физик Комптон высказал предположение, что при столкновении фотона $h\nu$ с электроном в молекуле может быть получено два результата: либо фотон нацело поглощается молекулой, причем его энергия полностью используется на фотоэлектрический эффект; либо, наоборот, его столкновение с электроном совершенно отлично по своей природе, и фотон отдает лишь часть своей энергии, в результате чего получается фотон низкой частоты и, следовательно, энергии, а электрон

Рис. 11.

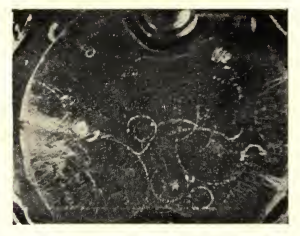

Рис. 12.

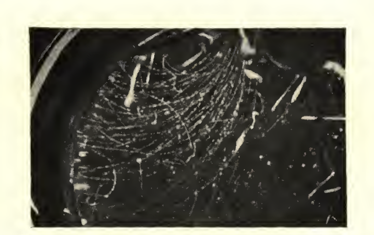

Рис. 13.

Рис. 14.

приобретает энергию, равную разности между энергиями падающего и отраженного фотонов.

Рассматривая столкновение между фотоном и электроном с точки зрения законов механики и, в частности, механики относительности, мы получаем количественное и притом полное представление об этом явлении. Таким образом, эффект Комптона является очень точным экспериментальным подтверждением корпускулярного строения не только вещества, но и света, и доказывает факт существования фотонов, которые при столкновении с электронами подчиняются всем обычным законам сохранения энергии и количества движения при соударении.

На рис. 12 воспроизведена фотография, показывающая электроны, выброшенные в газ в результате эффекта Комптона. Каждый из них выбрасывается в результате соударения с падающим фотоном, теряющим часть своей энергии и отдающим ее электрону, который приобретает вследствие этого способность ионизовать газ на своем пути. Для того чтобы показать, что траектории ионизации действительно принадлежат отрицательным электронам, они были подвергнуты воздействию магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости рисунка. Оказалось, что траектории отрицательных электронов искривляются в направлении, соответствующем знаку их заряда.

Этот снимок был получен Д. В. Скобельцыным *, который, используя фотоны очень высокой частоты, соответствующие лучам тория при прохождении последних через воздух, наблюдал в камере Вильсона комптоновские электроны. В отличие от фотоэлектронов, начальная скорость комптоновских электронов неодинакова, хотя все они происходят от одних и тех же фотонор. В зависимости от условий, в которых происходит соударение между электроном и фотоном, количество энергии, передаваемое последним первому, может быть различно, что доказывается различной кривизной траекторий электронов в магнитном поле. Кривизна эта тем больше, чем меньше скорость электрона.

Далее, снимок показывает, что треки водяных капелек, образованные комптоновскими электронами, имеют правильную форму, а не изогнуты и спутаны, как следы фотоэлектронов на предыдущем снимке.

Они представляют собой более или менее правильные окружности, так как по мере замедления движения кривизна траектории увеличивается и последняя принимает форму спирали. В то же время наблюдается полное отсутствие траекторий, изогнутых

* Дмитрий Владимирович Скобельцын — крупный советский исследователь в области космических лучей. В 1927 г. Скобельцын впервые применил камеру Вильсона для изучения космических лучей. Эта методика оказалась весьма плодотворной и в значительной мере определила дальнейшие этапы исследования явлений микромира. — *Прим. ред.*

под углом. Это объясняется тем, что большая скорость движения комптоновских электронов вызывается высокой энергией фотонов, с которыми они сталкиваются. Поэтому при соударении они испытывают значительно меньшие отклонения, чем в предыдущем случае. На рисунке совершенно ясно видно, что лучи тория пересекают газ снизу вверх. Соответствующий фотон сталкивается в молекуле с электроном и выбивает его оттуда в результате эффекта Комптона. Траектория этого электрона загибается под влиянием магнитного поля, причем кривизна ее возрастает по мере того, как скорость электрона убывает в результате ионизирующих столкновений с молекулами.

На рис. 13 мы видим еще одну разновидность электронов, а именно β-лучи радиоактивных веществ, которые также состоят из катодных частиц или отрицательных электронов, но обладают значительно большей скоростью, чем электроны, выбрасываемые катодом в трубке Крукса или в результате фотоэлектрического эффекта под действием рентгеновских лучей.

В данном случае β-лучи испускаются радием. Если мы будем пропускать пучок таких β-лучей через газ и расширим последний в камере Вильсона для конденсирования водяных капелек, то увидим, что под влиянием магнитного поля, перпендикулярного к плоскости снимка, все траектории отрицательных электронов окажутся изогнутыми в одном направлении. Отсюда можно заключить, что β-лучи также состоят из индивидуальных частиц, отрицательных электронов или катодных частиц, которые оказались полностью тождественными с частицами, входящими в состав отрицательного излучения, рассмотренного нами выше.

Теперь мне остается сказать несколько слов относительно других частиц, входящих в состав вещества. Как вы знаете, особенно ценные данные в этой области были получены в результате изучения явлений радиоактивности. Наряду с γ-лучами, о которых я упоминал выше и которые представляют собой световые лучи очень высокой частоты, состоящие из фотонов чрезвычайно большой энергии, и β-лучами, состоящими из отрицательных электронов, радиоактивные вещества испускают также α-лучи, состоящие из положительно заряженных частиц. Резерфорду удалось показать, что α-лучи представляют собой атомы гелия, несущие удвоенный элементарный заряд.

Масса α-лучей превосходит массу отрицательного электрона приблизительно в 7000 раз и обладает значительной энергией, так как они выбрасываются со скоростью 15 000—25 000 *км/сек.* Благодаря высокой энергии и величине электрического заряда прохождение α-лучей через вещество сопровождается рядом катастроф: они разрушают молекулы, ионизуют газы, и, ввиду того, что их заряд вдвое больше заряда электрона, создают на своем пути большое число ионов на единицу пути.

Рис. 14 воспроизводит фотографию расширения в газе (аргоне), через который проходят α-лучи. В аппарате был помещен источник, испускающий пучок расходящихся лучей. Треки капелек в данном случае значительно гуще, чем те, которые появляются на пути прохождения отрицательных электронов; каждый из них представляет собой туман, сконцентрировавшийся на пути прохождения α-частицы.

Как вы знаете, рассмотрение этих снимков навело Резерфорда на мысль о так называемом ядерном строении материи. Резерфорд заметил, что в то время как траектории α-частиц почти всегда прямолинейны (что объясняется значительностью их массы по сравнению с массой электронов, вследствие чего они не отклоняются от своего пути при столкновении с последними), в некоторых случаях наблюдаются очень значительные и резкие отклонения, указывающие на наличие соударений особого рода.

Рассматриваемый нами рисунок (14) изображает снимок α-лучей тория *C* в аргоне. На этом снимке мы видим ломаную траекторию, получившуюся в результате соударения α-частицы с частицей аргона при исключительных условиях: частица отразилась под острым углом к своему первоначальному направлению. Такие исключительные соударения наблюдаются приблизительно один раз на 100 миллионов ионизирующих столкновений с выбиванием электронов.

Мы видели выше, что, зная число Авогадро N, мы можем вычислить размеры атомов, т. е. область, занимаемую внутри их электронами. Таким образом, для предполагаемых шаровидных атомов были вычислены радиусы порядка 10^{-8} *см*. Этот результат подтверждается рядом согласующихся между собою вычислений и, в частности, результатами дифракции рентгеновских лучей на кристаллах. Необычайная редкость исключительных столкновений, значительно отклоняющих траектории α-лучей, указывает на то, что область, в которой сосредоточена большая часть массы атома, должна быть значительно меньше самого атома. Так как исключительные столкновения в 100 000 000 раз реже обычных ионизирующих столкновений, то, взяв корень квадратный из этого отношения, для учета пропорциональности пронизываемой площади квадрату радиуса, получаем, что радиус области, в которой сосредоточена масса атома, в 10 000 раз меньше радиуса самого атома, т. е. что размеры этого ядра атома порядка 10^{-12} *см*. В результате изучения этих исключительных отклонений Резерфорд показал, что для подавляющего большинства столкновений отклонение α-частицы вызывается так называемым кулоновским отталкиванием между ее положительным зарядом и зарядом того же знака ядра, в котором сконцентрирована масса атома и вокруг которого вследствие электростати-

ческого притяжения удерживаются отрицательные электроны, необходимые для того, чтобы компенсировать положительный заряд ядра в электрически нейтральном атоме. Таким образом, возникло представление об атоме как о планетной системе, в которой ядро играет роль центральной притягивающей массы, причем вокруг этой массы вращаются электроны, описывающие орбиты, размеры которых могут в десятки тысяч раз превышать размер центрального ядра.

В результате другого фундаментального открытия Резерфорд показал, что в ядрах отдельных атомов некоторые из исключительных столкновений влекут за собой распад ядра с испусканием ядер водорода, наиболее простых по своему строению из всех ядер. Эти ядра, известные под названием протонов, несут положительный заряд, равный по величине элементарному заряду. На этом основании была разработана теория строения материи, которая еще года два назад пользовалась общим признанием и согласно которой материя состоит из отрицательных электронов и протонов. Согласно этой теории, атомы с массой, большей массы атома водорода, получаются путем соединения ядер атомов водорода. Так, например, атом кислорода получается в результате соединения 16 атомов водорода. Наблюдаемые отклонения величин атомных масс от целых кратных масс атома водорода, а также потеря массы в результате конденсации водородных ядер были объяснены новой релятивистской механикой на основе принципа инертности энергии.

Вы знаете, что незначительные различия в массе, рассматривавшиеся раньше как доказательства против представления о единстве материи, в настоящее время служат указаниями на наличие определенных количеств энергии, выделяющихся или поглощающихся в моменты синтеза атомов или же в моменты их распада. Нам открылась совершенно новая область знания — область ядерной физики, или область ядерных превращений, в которой измерения масс указывают на количества энергии, участвующие в процессе.

Мы пришли к следующему представлению: атом с атомной массой A образуется в результате конденсации A атомов водорода, т. е. A протонов, или водородных ядер, и A электронов. Из этих A электронов $A - Z$ остаются в ядре, а Z вращаются вокруг него, образуя периферические электроны. Число Z представляет число элементарных зарядов в положительном заряде ядра и — что самое удивительное — в то же время атомное число, т. е. место, занимаемое атомом в периодической системе элементов.

Таково было положение вещей до недавнего времени, когда сокровищница наших экспериментальных знаний снова обогати-

лась в результате открытия сначала нейтрона, а затем положительного электрона, или позитрона.

В заключение своего экспериментального введения я предложу вашему вниманию несколько рисунков, воспроизводящих фотографии, имеющие отношение к открытию нейтронов и положительных электронов. Эти открытия стали возможны также в результате применения бомбардировки α-частицами. Проф. Боте и его сотрудник Беккер, наблюдая эмиссию сильно проникающего излучения при бомбардировке легких атомов бериллия, бора и лития лучами полония, вначале предположили, что излучение состоит из очень жестких γ-лучей. Однако опыты Ирены Кюри и Фредерика Жолио показали, что под действием этих лучей на газ в ионизационной камере ионизация значительно увеличивается благодаря присутствию водородсодержащего вещества. Используя, в частности, снимки, сделанные в камере Вильсона, Кюри и Жолио показали, что излучение Боте и Беккера обладает способностью вырывать протоны, т. е. водородные ядра, из веществ, содержащих химические соединения водорода.

γ-лучи не могут обладать таким свойством. Исследования Чадвика привели к предположению, что проникающее излучение Боте и Беккера состоит — по крайней мере, частично — из незаряженных материальных частиц. Эти частицы, получающиеся в результате обмена количеств движения с ядром водорода или другими ядрами, выбитыми из вещества, оказывается, имеют массу того же порядка, что и величина массы водородного ядра — протона, но без заряда. Поэтому частица не ионизирует газа на своем пути, так как ионизация вызывается, главным образом, действием электрического заряда атомного снаряда на электроны. Когда снаряд не наэлектризован, шансы на ионизацию становятся минимальными.

Насколько можно судить на основании экспериментальных данных, может наблюдаться, самое большее, одна ионизация, один электрон, выбитый непосредственно одним нейтроном при пробеге последним в воздухе пути длиной не менее 30 *м*. Таким образом, заметная ионизация под действием нейтронов возможна только через посредство протонов или других выбиваемых нейтронами заряженных ядер.

Такая эмиссия нейтронов под действием α-лучей полония является результатом настоящей трансмутации и приводит нас к предположению о наличии нейтронов в ядрах бериллия и бора, если только они не порождаются в момент столкновения в результате соединения протона с отрицательным электроном.

Так, например, можно предположить, что бор с массой 11, поглощая частицу с массой 4, дает атом азота с массой 14 и нейтрон с массой 1. Величины электрических зарядов не проти-

воречат этому представлению, так как заряд ядер бора равен 5, α-частицы — 2, азота — 7 и нейтрона — 0, Рис. 15 воспроизводит фотографию, полученную Иреной Кюри и Жолио.

Прямолинейная траектория изображает путь протона, выбитого из парафина под действием нейтронов. Бериллий подвергается бомбардировке α-лучами полония. Получающиеся в результате бомбардировки нейтроны проходят через экран, покрытый слоем парафина, из которого они вырывают протоны. Последние заряжены положительным зарядом 1 и, проходя через газ, ионизируют его. Все это видно на рисунке.

Рис. 16 изображает другой протон, вырванный из молекулы воды. Он происходит не из парафина, а из какой-то точки в массе газа. Этот протон был вырван из водорода, входящего в состав молекулы воды.

Рис. 17 изображает другой эффект нейтрона, способного выбивать не только ядра водорода, но и другие ядра, в данном случае ядро азота, входящее в состав молекулы азота воздуха. Траектория такого ядра представляет собой короткую толстую линию. В периодической системе элементов азот занимает седьмое место; заряд ядра азота равен 7, и ионизирующее действие его на газ значительно превосходит ионизирующее действие α-частиц с зарядом 2. Он дает густой туман и короткие траектории.

Рис. 18 изображает действие нейтрона на ядро азота, но на этот раз сопровождающееся распадом. Наряду с короткой и толстой линией на рисунке мы видим другую, более тонкую и более длинную линию, которая является следом α-частицы. В данном случае, столкнувшись с ядром азота, нейтрон выбивает из него α-частицу. Что же касается масс, то в результате этого столкновения $[(14 + 1) - 4]$ мы получаем 11; таким образом, остается бор. Рассмотрение баланса ядерных зарядов приводит к тому же выводу.

В данном случае реакция противоположна той, которая приводит к рождению нейтрона при бомбардировке бора α-частицами. Таким образом, впервые было получено экспериментальное доказательство обратимости реакции ядерного превращения. Этот факт сам по себе чрезвычайно интересен и важен.

За открытием нейтрона последовало открытие положительного электрона, или позитрона. То же излучение, вызванное действием α-лучей полония на легкие атомы лития, бериллия или бора, содержит, кроме нейтронов, также γ-лучи высокой частоты, фотоны которых, обладающие очень большой энергией, при столкновении с ядрами атомов вызывают эмиссию не только отрицательных, но также и положительных электронов.

На рис. 19 вы можете заметить траектории электронов гораздо более тонкие, чем следы протонов, и изогнутые под влиянием магнитного поля, отклоняющего отрицательные электроны в известном направлении. И вот, из той же точки выходит другая траектория, искривленная в обратном направлении. Этот снимок был сделан Иреной Кюри и Жолио. Получение из одного фотона двух электронов с обратными знаками является фактом необычайной важности, свидетельствующим о подлинной материальности света. Существование положительного электрона и его получение из фотона одновременно с отрицательным электроном было предсказано два года назад Дираком как следствие разработанной им теории электрона. К этому вопросу я еще вернусь.

Рис. 20 изображает траектории положительных и отрицательных электронов, направленных в противоположные стороны под влиянием магнитного поля. Источник их всегда один и тот же. На этом рисунке мы видим также траекторию протона, порожденного действием нейтрона, между тем как положительные и отрицательные электроны порождены сильно проникающими γ-лучами. Это дает основание думать, что положительные электроны, открытые лишь недавно, гораздо многочисленнее, чем предполагалось раньше; их нетрудно было заметить, если бы на это было обращено больше внимания. Повидимому, их существование очень кратковременно, и они исчезают по мере возрастания плотности вещества — либо в результате нейтрализации отрицательного электрона, сопровождающейся испусканием света, либо путем соединения с нейтроном и образования протона.

На рис. 21 воспроизведена другая фотография, подтверждающая выводы Ирены Кюри и Жолио. Положительные и отрицательные электроны, а также протоны можно получить, не прибегая к посредству бериллия или бора. Непосредственное действие α-лучей полония на алюминий дает тот же результат.

Совсем недавно Тибо показал, что радиоактивные вещества испускают положительные электроны, хотя и в меньшем количестве, чем отрицательные или β-лучи, однако величины того же порядка. С помощью остроумного метода ему удалось определить приблизительное значение отношения заряда положительного электрона к его массе, которое, по абсолютной величине и в пределах ошибки опыта, оказалось равным такому же отношению для отрицательного электрона.

Значение этих экспериментальных результатов чрезвычайно велико. В настоящее время физика занята приведением в порядок накопленного экспериментального материала, и в частности попытками выяснить взаимосвязь между новыми составными частями вещества — нейтронами и положительными электронами

и сравнительно давно известными — протонами и отрицательными электронами.

В настоящий момент мы имеем четыре частицы материи: отрицательные электроны, положительные электроны, нейтроны и протоны. Что же касается света, то там мы имеем дело с фотонами, представляющими собой как бы пятую составную часть материи вселенной *.

Я упоминаю о фотонах как о некой постоянной материальной части вселенной, хотя фактически частота их непрерывно меняется при переходе от одного фотона к другому; так что, по крайней мере по внешности, мы имеем дело с неограниченным числом фотонов. Однако не следует забывать, что изменение частоты фотона в известной мере соответствует изменению скорости в случае электрона или протона, которые, несмотря на изменение скорости, а следовательно, и энергии, продолжают оставаться теми же протонами и электронами.

Несколько иное положение мы имеем в случае фотонов, так как фотон, т. е. свет, распространяется всегда с одинаковой скоростью, а именно со скоростью света. Заметим, однако, что изменение движения наблюдателя, вызывающее изменение скорости протона и электрона, в результате эффекта Допплера сопровождается одновременным изменением частоты любого данного фотона.

Утверждая, что наряду с электронами и протонами все фотоны представляют собой некоторую составную часть вселенной, мы этим хотим сказать, что лишь частота фотонов меняется в зависимости от движения наблюдателя, так же как мы говорим, что природа протона или электрона не меняется с изменением скорости его движения по отношению к наблюдателю.

Некоторая часть физиков высказывает мнение, согласно которому нейтрон есть не что иное, как соединение протона с отрицательным электроном, причем соединение это более тесное, чем в атоме водорода. В таком случае квантовый уровень будет ниже того, который соответствует стабильному невозбужденному атому водорода.

Учитывая, что размеры, которые мы должны приписать нейтрону, по порядку величины не превосходят размеров ядра, т. е. меньше 10^{-12} *см*, можно сказать, что такое предположение вполне возможно, так как в случае величины указанного порядка обычные уравнения для электрона теряют свою приложимость. Поэтому нет ничего удивительного в том, что законы квантова-

* В настоящее время известны и другие частицы материи: положительно и отрицательно заряженные мезоны, большая группа варитронов (частицы, открытые советскими физиками А. И. Алихановым и А. И. Алиханяном), гравитоны и нейтрино. — *Прим. ред.*

Рис. 15.

Рис. 16.

Рис. 17.

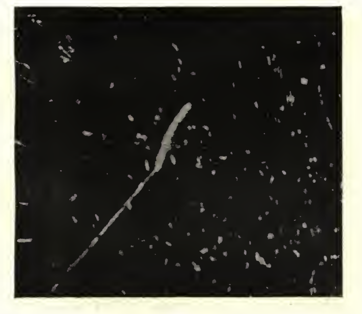

Рис. 18.

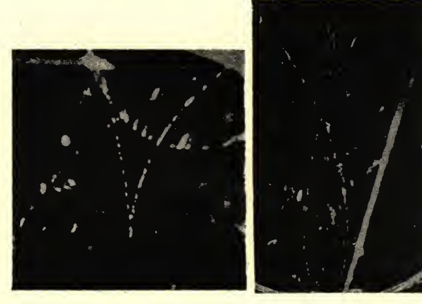

Рис. 19.

Рис. 20.

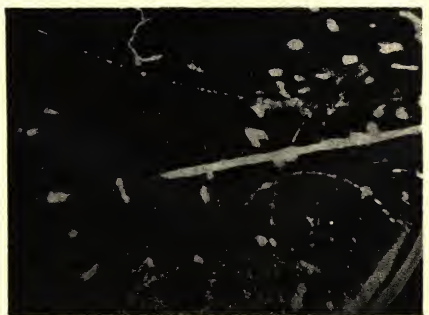

Рис. 21.

ния движения электрона в атоме водорода — справедливые для тех случаев, когда расстояние между электроном и ядром достаточно велико, чтобы их взаимодействие подчинялось закону Кулона, — теряют свою приложимость в случае нейтрона; последний может представлять пример более тесной связи между протоном и электроном, чем та, которая наблюдается в устойчивом атоме водорода.

Другие теории полагают, что протон является результатом соединения нейтрона с положительным электроном, или позитроном. Существуют доказательства как в пользу одной, так и в пользу другой теории *.

Во всяком случае, открытие нейтрона приводит к предположению, что все атомные ядра состоят из протонов и нейтронов **. Ядро с атомным номером Z и массой A должно состоять из Z протонов и $A-Z$ нейтронов. Можно также предположить существование внутри ядра, в качестве промежуточных компонентов, α-частицы или ядер гелия, образовавшихся соединением двух протонов с двумя нейтронами.

Что касается положительного электрона, следует признать, что он представляет собой наиболее сложную проблему. Его открытие привлекло внимание физиков к предположению, высказанному Дираком за два года перед тем. Согласно теории Дирака, отрицательный электрон может находиться как в отрицательных, так и в положительных энергетических состояниях.

В нормальном состоянии пространство заполнено отрицательными электронами с отрицательной энергией, наэлектризованность которых никак не проявляется именно в силу однородности заполненного таким образом пространства.

Однако можно себе представить, что под влиянием фотоэлектрического эффекта, или эффекта Комптона, фотону с достаточно высокой энергией удается вырвать один из таких отрицательных электронов с отрицательной энергией и сообщить ему положительную энергию. Такой электрон оставляет за собой «дырку», т. е. незаполненное отрицательное энергетическое состояние, которая, согласно Дираку, должна вести себя как электрон с положительным зарядом и положительной энергией.

Эта теория, согласно которой положительные электроны превращаются в «дырки» в среде, нормально заполненной отрицательными электронами в отрицательных энергетических

* Теперь оба эти предположения оставлены. В настоящее время установлено, что как протон, так и нейтрон являются элементарными, т. е. не состоят ни из каких других известных нам частиц. Однако они обладают свойством в соответствующих условиях, например в атомном ядре, превращаться друг в друга. — *Прим. ред.*

** Впервые такое предположение высказал советский физик Д. Д. Иваненко. — *Прим. ред.*

состояниях, хотя и поражает нас с первого взгляда, однако при ближайшем рассмотрении приводит к некоторым интересным выводам, в частности относительно вероятной продолжительности «жизни» позитрона. Действительно, если рассматривать положительный электрон как «дырку», то для заполнения этой «дырки» в материи имеется достаточное количество обыкновенных отрицательных электронов, возрастающее по мере увеличения плотности вещества. При этом они должны будут перейти из состояния положительной энергии, в котором мы их наблюдаем, в состояние отрицательной энергии, до того остававшееся незаполненным в виде «дырок».

Такой переход из исходного состояния положительной энергии в состояние отрицательной энергии должен сопровождаться освобождением энергии в виде одного или нескольких фотонов.

Исходя из этой теории и используя методы новой квантовой электродинамики, можно вычислить среднюю продолжительность «жизни» положительного электрона, например, в воздухе при атмосферном давлении. Согласно вычислениям Дирака, средняя продолжительность «жизни» позитрона равна одной десятимиллионной доли секунды. Это не должно нас удивлять. Другие частицы не более долговечны. Изучение радиоактивности дало нам возможность обнаружить существование атомов, средняя продолжительность «жизни» которых равна одной миллионной доли секунды. Существует много доказательств в пользу того, что радикал CH_3 в свободном состоянии существует не более одной тысячной секунды.

Что же касается позитрона, то продолжительность его «жизни» в воздухе при атмосферном давлении равна одной десятимиллионной секунды и несколько больше в разреженной среде. При отсутствии отрицательных электронов для заполнения «дырок» последние могли бы существовать в течение неопределенно долгого времени. В твердых телах, где количество отрицательных электронов очень велико, существование «дырок» определяется мгновениями. Это нисколько не противоречит возможности наблюдения положительного электрона в камере Вильсона; так как скорость его очень велика, она может быть измерена по кривизне его траектории. В наблюденных случаях эта скорость была порядка девяти десятых скорости света. Это означает, что отрезок, скажем, в тридцать метров проходится в одну десятимиллионную долю секунды. Благодаря значительно меньшим размерам камеры Вильсона положительный электрон успевает совершить свой пробег и вызвать ионизацию газа.

Мы видим, что результаты эксперимента не только подтверждают вероятность, но с очевидностью доказывают реальность

корпускулярного строения света и вещества. Посмотрим теперь, как обстоит дело с теоретической точки зрения.

Как я уже упоминал, казалось вполне разумным и закономерным рассматривать вновь открытые составные части материи атомных и субатомных размеров как материальные частицы. В этом случае мы поступили так, как поступают физики во всех тех случаях, когда им приходится столкнуться с совершенно новым явлением: мы попытались объяснить неизвестное с помощью уже известного и использовать в данном случае представления, оказавшиеся пригодными для объяснения других явлений.

Другого пути не существует, и лишь неудача такой попытки заставляет пересмотреть проблему с самого начала и искать выхода на пути создания совершенно новых представлений.

Это время совпало с тем сравнительно непродолжительным периодом (30 лет для изучения атома и около 20 — для ядра), в течение которого физика внезапно совершила переход от того, что можно назвать нормальным и привычным этажом нашего опыта, унаследованного от предков, этажом макроскопическим, на котором были созданы все основные понятия, служившие нам до сих пор для объяснения картины мира, — к другим, наиболее глубоким областям действительности, которые стали доступны исследованию благодаря колоссальному развитию экспериментальной техники. Среди новых представлений о реальности наряду с представлениями о пространстве и времени нужно, в особенности, остановиться на представлении об отдельном предмете, неподвижном или движущемся, мысленно отделенном от остальной вселенной и, несмотря на все изменения, обладающем индивидуальным и устойчивым существованием.

Это — в сущности объективное представление об индивидууме, возникшее в человеческом сознании в результате взаимоотношений между людьми, экстраполированное и антропоморфно перенесенное на объект и частицу. Из мира унаследованных от прошлого поверхностных макроскопических представлений мы не так давно вынуждены были перейти в сферу, окружающую атомное ядро, где мы встретились с электронами, которые вызывают явления испускания и поглощения всех видов светового излучения, включая и рентгеновские лучи, и позволяют, на основе представления об их обмене между атомами, объяснить все химические реакции, за исключением тех, в которых играют роль ядерные превращения.

Однако, едва только мы свыклись с новой областью и стали понемногу разбираться в новых явлениях, дальнейшие исследования ядра открыли перед нами новую область, в которой все

явления совершаются в масштабах в 10 000 раз меньших, чем масштабы атома. Совершенно естественно, что, переходя из одной области в другую, мы на первых порах пытаемся осмыслить происходящее, используя для этого представления, оказавшиеся более или менее пригодными в прошлом.

Когда 20 лет назад было открыто ядерное строение атома, ученые решили уточнить его с помощью планетарной модели. Атом представлялся в виде системы, состоящей из центрального положительно заряженного «солнца», заряд которого равен Z элементарных зарядов, окруженного Z «спутниками», роль которых играли отрицательные электроны, обращающиеся вокруг него под действием притяжения положительного заряда «солнца» и отталкивания со стороны отрицательных зарядов других электронов, причем последние действия представлялись аналогичными возмущающему действию движения одной «планеты» на движение остальных «планет».

Эта картина представляет собой то, что мы называем атомом Резерфорда — Бора. Теоретические последствия, вытекающие из такого ядерного представления об атоме, впервые были развиты Бором; при этом он натолкнулся на значительные трудности. Чтобы дать представление об этих затруднениях, я воспользуюсь простейшим случаем, с которым Бору пришлось иметь дело в самом начале, а именно: случаем атома водорода с одним протоном в центре и одним электроном, обращающимся вокруг него. Здесь пертурбации отсутствуют и налицо лишь притяжение центрального протона.

Согласно классической теории электромагнетизма Максвелла и Лоренца, заряженная частица, когда ей сообщается ускоренное движение, испускает свет и, следовательно, теряет энергию. Электрон, обращающийся вокруг ядра и совершающий по своей орбите движение, необходимо связанное с известным ускорением, должен излучать и в силу этого терять известную долю своей энергии. По прошествии некоторого времени, которое нетрудно вычислить и которое оказывается равным небольшой доле секунды, электрон должен упасть на ядро и нейтрализовать его. Однако, как мы знаем, атом водорода устойчив, и его существование исчисляется, по всей вероятности, миллиардами лет.

С другой стороны, электромагнитная теория предполагает, что излучение, испускаемое электроном при обращении вокруг ядра, должно обладать частотой, равной числу оборотов в секунду. Следовательно, частота этого излучения должна изменяться непрерывно, по мере приближения электрона к ядру в результате потери им энергии, и поэтому излучение должно было бы иметь непрерывный спектр.

Таким образом, мы видим, что планетарная гипотеза приводит к двум выводам, противоречащим опыту: во-первых, предположению о неустойчивости атома, теряющего свою энергию в результате излучения, а во-вторых, к предположению о непрерывности спектра излучения, в то время как хорошо известно, что все атомы, включая атом водорода, имеют прерывные линейчатые спектры.

Чтобы не порывать с планетарной гипотезой, основывающейся на законах механики, которая в известной степени помогала разобраться в лабиринте новых представлений, Бор прибег к компромиссу. Для этого он использовал представление о квантах излучения, выдвинутое Планком, согласно которому излучение атома или испускание света материей может совершаться только определенными порциями и квантами, равными $h\nu$. Бор предложил теорию, вводящую представление о прерывности в ту область, где электромагнитная теория предполагала только непрерывность, и, не порывая с классической механикой, считал необходимым произвести отбор среди бесконечного и непрерывного ряда возможных движений электрона, иначе говоря — квантовать эти движения, как мы сказали бы сейчас, оставляя из них только прерывный ряд, каждый член или терм которого должен соответствовать устойчивому состоянию атома. Бору принадлежит гениальная идея — связать эти устойчивые состояния с термами, введенными в спектроскопию на основе комбинационного принципа для объяснения разностями этих термов частот различных линий в одном и том же атомном спектре. Предположение, что в атоме поглощение и испускание лучистой энергии совершается путем резких переходов из одного устойчивого состояния в другое (причем квант испускаемой или поглощаемой лучистой энергии равен разности энергий между исходным и конечным состояниями), сразу же позволило объяснить тот факт, что частота линии, соответствующей излучению, спектроскопически равна разности между термами, соответствующими двум состояниям атома. Среди непрерывного ряда решений, возможных с точки зрения механики, Бор отобрал те, благодаря которым можно объяснить движения электронов и состояние атома, рассматриваемых как устойчивые; причем он достиг этого с помощью первого, очень простого правила, так называемого правила квантования, которое впоследствии было обобщено и распространено на самые общие случаи системы, состоящей из любого числа электронов.

Таким образом, Бор нанес удар электромагнитной теории, предположив, во-первых, что эти выделенные и квантованные движения могут не сопровождаться излучением, что́, с точки зрения электромагнитной теории, недопустимо, а во-вторых, что при

известных, правда, еще не выясненных, условиях электроны могут переходить от одного такого квантованного движения к другому с испусканием кванта излучения, если переход совершается от более высокого энергетического состояния к более низкому, или, наоборот, — с поглощением одного кванта внешнего излучения в том случае, когда переход совершается от более низкого энергетического состояния к более высокому. Эта основная идея, трудно допустимая с точки зрения теории, оказалась поразительно плодотворной на практике. Если бы не успешное применение идеи Бора к объяснению атома водорода, последующее развитие квантовой теории и волновой механики оказалось бы невозможным.

Так появилась эта эклектическая теория, оказавшаяся чрезвычайно полезной, несмотря на всю свою противоречивость и нелогичность, и облегчившая переход от старых представлений механики и электромагнетизма, неприложимых к субатомным явлениям, к новым представлениям, которые в настоящее время разрабатываются квантовой электродинамикой. Вы знаете, каким образом квантование атома водорода Бором на основе классической механики, а затем квантование Зоммерфельдом того же атома водорода, используя механику теории относительности, привело к интерпретации атомного спектра водорода, сыгравшей чрезвычайно большую роль в развитии спектроскопии.

Это была, если можно так выразиться, счастливая случайность, оказавшаяся чрезвычайно благоприятной для дальнейшего развития физики. Действительно, результат получился отрицательным при первой же попытке перейти от случая одного электрона, обращающегося вокруг ядра, к случаю двух электронов, например в атоме гелия, ядро которого, представляющее собой α-частицу, имеет два положительных заряда и, следовательно, в неионизированном состоянии — два периферических электрона.

Пришлось признать, что квантование в смысле Бора и Зоммерфельда не в состоянии разрешить проблемы внутриатомной динамики.

С этого времени начинается развитие, с одной стороны, того, что известно под названием «квантовой динамики» или динамики матриц Гейзенберга, Борна, Иордана и др., а с другой — волновой механики, разработанной Луи де Бройлем, Шредингером, Дираком и др.

Вы знаете, в чем состоит исходная идея де Бройля, который в известной степени повторил (но в обратном направлении, а именно в отношении вещества) путь, проделанный в отношении света для объяснения фотоэлектрического эффекта, эффекта Комптона и пр. Наряду с световыми волнами, прекрасно объяс-

няющими ту область оптики, которую можно назвать классическим аспектом, т. е. такие явления, как интерференция, дифракция и пр., пришлось также выдвинуть корпускулярную гипотезу строения света. В настоящее время фундаментальной проблемой, стоящей перед теорией излучения, является синтез корпускулярной и волновой концепций (волн и фотонов), из которых каждая в отдельности объясняет взаимно дополняющие друг друга и в известном смысле противоположные аспекты реальности.

Де Бройль исходил из предположения, что возможный выход из тупика, в котором очутилась электродинамика, может быть найден путем сочетания волн с частицами, электронами, протонами и пр., подобно тому, как в оптике вынуждены были связать волны с корпускулами. Он предположил, что между энергией частицы, хорошо известной для вещества, и частотой новой волны существует та же связь, которая определяется соотношением Планка *. Но в данном случае соотношение используется для того, чтобы частоту волны вывести из энергии частицы, а не как в случае света, когда энергия частицы определяется из частоты волны.

Эта теория, получившая свое дальнейшее развитие благодаря специальной теории относительности, вскоре убедительно была подтверждена опытами Девисона и Джермера, а также Дж. П. Томсона; они дали наглядное и ощутимое представление о волновом аспекте материи **, казалось бы столь далеком, по крайней мере внешне, от корпускулярного аспекта, с такой конкретной реальностью выявленного в опытах Вильсона.

Фотография, воспроизведенная на рис. 22, была получена Трилья; она изображает дифракцию рентгеновских лучей при

* Диссертация де Бройля, в которой он делал первые шаги в обосновании волновой механики (1924 г.), была выполнена под руководством Ланжевена.

Формула де Бройля получилась в результате распространения известного соотношения $E = mc^2$ на фотоны. Если m — масса фотона, ν — частота, то $E = h\nu = mc^2$; откуда λ (длина волны) $\frac{c}{\nu} = \frac{h}{mc}$.

Де Бройль выдвинул предположение, что приведенное соотношение имеет силу не только для фотонов, движущихся со скоростью c, но и для любых других частиц, имеющих другие скорости v: $\lambda = \frac{h}{mv}$ (формула де Бройля). — *Прим. ред.*

** Девисон и Джермер (1927) исследовали рассеяние электронов при падении на правильные монокристаллы никеля. Они обнаружили, что при этом электроны не просто рассеиваются, а дифрагируют подобно тому, как дифрагируют на кристаллах рентгеновские лучи.

В том же 1927 г. опытами Дж. П. Томсона была установлена дифракция быстрых электронов на поликристаллах, а опытами П. С. Тартаковского (Ленинград) — дифракция медленных электронов на поликристаллах.

Цикл этих опытов явился первым непосредственным подтверждением идеи де Бройля о «волнах материи». — *Прим. ред.*

прохождении через тонкую материальную пленку. Расположение дифракционных колец является характерной особенностью молекулярной или кристаллической структуры вещества пленки, причем для одного и того же вещества радиус колец увеличивается с возрастанием длины волны используемого рентгеновского излучения.

Рис. 23 воспроизводит фотографию, полученную Поитом при замене рентгеновских лучей катодными. Пучок электронов или электронных волн пропускался через пленку, содержавшую микроскопические кристаллы окиси цинка. Картина по внешнему виду совершенно аналогична той, которая получена с рентгеновскими лучами. Формулы де Бройля позволяют вычислить длины волн, связанных с электронами, исходя из скорости последних, и установить, что дифракционная картина полностью соответствует той, которая получается на основании вычисления длины волн. С увеличением скорости электронов длина волны уменьшается и дифракционные кольца суживаются.

* * *

Таким образом, мы стоим перед фактом двойственной природы как света, так и вещества, проявляющейся в двух аспектах: волновом в одних случаях и корпускулярном — в других.

Бор назвал эти два аспекта «взаимно дополнительными» и даже предложил в этой связи так называемый принцип дополнительности *. Должны ли мы примириться с такого рода противоречием, с положением вещей в некотором роде гегелевским, диалектическим, когда мы констатируем наличие противоречий, не реализуя, однако, их синтеза? Безоговорочное принятие такого решения и самоуспокоение представляются мне крайне нежелательными, в особенности, если учитывать основные тенденции нашей науки, которая, наоборот, всегда стремилась к наиболее полному и всеобъемлющему синтезу путем расширения старых представлений или создания новых в тех случаях, когда в этом возникала необходимость.

Такой синтез подготовлен работами ученых, стремившихся в точности выяснить связь между двумя противоположными аспектами, волновым и корпускулярным, в частности работами

* Фальсифицируя реальные физические факты, Бор и Гейзенберг придали этому «принципу дополнительности» реакционный, идеалистический характер. Согласно этому «принципу», возможно *или* причинное описание явлений, *или* описание их в пространстве и времени. Одно якобы исключает другое. — *Прим. ред.*

Рис. 22.

Рис. 23.

Борна, который полагает, что связь должна носить статистический характер *.

С этой точки зрения, волна — будь то вещества или света — играет роль определителя вероятности присутствия частиц: фотонов в случае света, электронов, протонов и т. д. в случае вещества, иначе говоря, показателя характера распределения частиц на фотографической пластинке по различным полосам интерференции или дифракции, т. е. распределения частиц во времени и пространстве при различных возможных индивидуальных состояниях. Однако такое статистическое представление не может удовлетворять нас, если мы будем сохранять старые корпускулярные концепции и представлять себе электроны, протоны и фотоны как отдельные обособленные предметы или объекты. В таком случае противоречие становится совершенно вопиющим. Гейзенберг, например, шесть лет назад выразил это создавшееся положение с помощью того, что он назвал «принципом неопределенности» — выражение, на мой взгляд, довольно неудачное, так как оно дает повод к злоупотреблению всевозможными неправильными истолкованиями.

Я хотел бы дать вам некоторое понятие об этом принципе неопределенности. Он представляет собой результат сосуществования корпускулярного и волнового аспектов материи. Если, согласно корпускулярной теории, мы характеризуем какую-нибудь частицу по ее положению с помощью некоторой координаты q, то динамика связывает с этой координатой другую сопряженную переменную, а именно, соответствующее количество движения, которое обозначается через p.

С точки зрения классической концепции, полагающей, что частица может быть прослежена по всему пути своего движения, допускают, что координата q может быть определена в любой момент и с любой желаемой точностью, иначе говоря, что погрешность Δq может быть сделана как угодно малой. Эта же концепция предполагает также возможность одновременного определения скорости, а следовательно, и количества движения с бесконечной степенью точности, выражаемой сделанной ошибкой Δp. Эти ошибки рассматриваются как независимые друг от друга, причем предполагается, что их произведение может быть сделано как угодно малым.

Наоборот, сущность принципа неопределенности состоит в утверждении, что в один и тот же момент невозможно равным образом с бесконечной точностью определить оба элемента и

* Этот «синтез» отнюдь не является окончательным. Современная физика далеко еще не раскрыла глубокой сущности единства корпускулярной и волновой сторон природы микрообъектов. Это еще дело будущего. — *Прим. ред.*

что произведение $\Delta p \cdot \Delta q$ допущенных ошибок ни при каких условиях не может быть меньше постоянной Планка h.

Весьма простое рассуждение дает возможность конкретизировать принцип неопределенности на примере одного специального случая, который я считаю полезным вам привести.

Предположим, что мы имеем пучок электронов, из которых каждый обладает скоростью и, следовательно, количеством движения, вполне определенным по величине и направлению. С точки зрения волновой механики, это означает, что плоская электронная волна определенной частоты и длины распространяется в определенном направлении, которое представляет собой направление количества движения и в данном случае предполагается горизонтальным. Электрон, входящий в состав пучка или связанный с волной, может оказаться в любой точке пространства, занимаемого волной. Таким образом, с точки зрения координаты q, которую я предполагаю вертикальной, его положение оказывается неопределенным; Δq очень велико, тогда как количество движения, которое, согласно соотношению де Бройля, равно частному от деления постоянной h Планка на длину волны, вполне точно определено, так же как и длина волны.

Если нам необходимо уточнить положение в вертикальном направлении, мы должны взять две пластинки, расположенные в одной и той же плоскости волны, и сблизить их таким образом, чтобы получить горизонтальную щель, перпендикулярную к направлению распространения. Чем уже будет эта щель, тем точнее можно будет определить положение электрона в вертикальном направлении, так как в данном случае величина ошибки в определении положения в точности равна ширине щели; Δq оказывается шириной щели.

Однако здесь мы сталкиваемся с экспериментальным фактом дифракции электронных волн. Если пропускать электроны и связанную с ними волну через узкую щель, то мы будем наблюдать дифракцию этой волны; так что и по другую сторону щели мы будем иметь электроны, скорость которых имеет различные направления. Порядок величины отклонения Θ, соответствующего этой дифракции в силу законов дифракции, дается отношением длины волн λ к ширине щели Δq, причем величина дифракции возрастает с увеличением длины волны и уменьшением ширины щели. Это означает, что направление количества движения, которое до прохождения через щель было вполне определенным, по выходе из щели становится неопределенным.

В вертикальном направлении, которое нас интересует, неопределенность относительно количества движения будет пред-

ставлена проекцией в этом направлении количества движения, отклоненного на угол Θ от горизонтали. Следовательно, неопределенность Δp будет пропорциональна величине количества движения $\frac{h}{\lambda}$, умноженного на угол Θ*, т. е. на $\frac{\lambda}{\Delta q}$, откуда:

$$\Delta p \sim \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{\Delta q},$$

т. е.

$$\Delta p \cdot \Delta q \sim h.$$

Это и есть соотношение неопределенности Гейзенберга, полученное как следствие экспериментального факта дифракции электронов.

* * *

Этот результат явился отправной точкой для провозглашения крушения детерминизма и утверждения, что частицы не имеют детерминированного движения, так как невозможно экспериментально установить положение и скорость или количество движения какой бы то ни было частицы. Во имя этого стали предаваться самым разнообразным видам интеллектуального разврата, провозглашая «свободу воли» частиц, свободный выбор природы и т. д.; утверждалось, что: «...теория квант выявила индетерминизм законов природы. Подчиняясь некоторым статистическим законам, налагаемым волнами, индивидуальный электрон, так же как и фотон, протон, атом или молекула, обладает известным простором действия, известной свободой, изменяемой и ограничиваемой постоянной Планка». В 1927 г. в Брюсселе Дирак сказал: «Есть известные моменты, когда природа делает выбор».

Некоторые ученые шли еще дальше. Так, например, Эддингтон в своей книге «Природа физического мира» пишет: «Можно, пожалуй, сказать в качестве вывода из современной науки, что, начиная с 1927 г., религия стала приемлемой для здравого научного ума. Если оправдается наше предположение, что в 1927 г. Гейзенбергу, Бору, Борну и др. удалось окончательно устранить строгую причинность, то этот год явится, несомненно, одной из самых значительных эпох в развитии научной мысли».

Другие, как, например, Бор, придерживаются выжидательной позиции. Они временно принимают противоречие как выражение другого принципа — «принципа дополнительности». Они утверждают, что волновой и корпускулярный аспекты представляют собой два взаимодополняющих аспекта реальности. Мы сталкиваемся то с одним, то с другим, и не стоит, говорят

* Собственно, на $\sin \theta$; так как угол θ весьма мал, то можно считать, что $\sin \theta = \theta$. — *Прим. ред.*

они, особенно стремиться примирить их друг с другом. Наоборот, возможно, что самое наличие этой двойственности может явиться средством для разрешения некоторых проблем философского порядка.

Нас окружает инертная материя, управляемая физико-химическими законами, и живая материя, подчиняющаяся законам биологии. Уже давно человечество стремится объединить в одно эти законы, добиться синтеза физики, химии и биологии. В настоящее время приходится слышать такие утверждения: «Вопрос о том, что же в сущности лежит в основе различия между этими двумя аспектами реальности, всегда интересовал человечество. Возможно, что это объясняется тем, что в физико-химических явлениях мы имеем дело с системами, в которых статистические законы немедленно вступают в действие, ограничивая проявления свободы со стороны электронов, в то время как живая природа обладает некими усилителями свободного выбора для известной части электронов. Можно представить себе, что в нашей центральной нервной системе имеются области, в которых время от времени отдельные электроны имеют возможность осуществлять свободу выбора. Таким образом, жизнь есть не что иное, как усилительная организация этого выбора».

Подобные выводы кажутся мне скороспелыми. На мой взгляд, дело обстоит отнюдь не так просто. Попытаемся более основательно разобраться в создавшемся положении.

Открытие внутриатомной области познакомило нас с множеством нового: с электронами, квантами, ядрами. Мы вступили в эту область, вооруженные несовершенными представлениями, полученными на основе предыдущего опыта, в основном применительно к механике. Мы рассматривали электроны и другие частицы как своего рода экстраполяцию до крайних пределов малости привычных нам предметов. Наконец, мы предполагали возможным, хотя бы мысленно, следить за движением этих предметов, говорить об их положении и движении.

Однако опыт показал нам, что в один и тот же момент невозможно точно определить положение и скорость элементарной частицы и что такая постановка вопроса бессмысленна. Отсюда мы делаем поспешное заключение, что в основе законов природы лежит индетерминированность. Не будет ли более правильным допустить, что наше представление об элементарных частицах еще несовершенно и что невозможно составить себе представления о внутриатомном мире путем простой экстраполяции наших макроскопических представлений о движении? Из того, что природа не дает нам точного ответа на наши вопросы относительно элементарной частицы, было бы слишком самонадеянно делать вывод об отсутствии детерминизма в природе. Не

будет ли более верным признать, что вопрос поставлен неправильно и что в природе нет такой вещи, как «движущаяся элементарная частица?»

Наш вопрос подразумевает разработанное нами самими представление о частице. Если мы не получаем на него ответа, то нечего обвинять в этом природу; не лучше ли поставить вопрос иначе, что, конечно, труднее, но зато несравненно плодотворнее.

То, что понимается в настоящее время под кризисом детерминизма, представляет собой на самом деле кризис механицизма, который мы пытаемся приспособить для понимания новых явлений. Мы убеждаемся, что представления и понятия, которыми мы пользовались в макроскопическом мире, созданные для этого мира и использованные с успехом в течение столь многих поколений, будучи перенесены в область микроскопических величин, оказываются непригодными.

Такая постановка вопроса кажется мне несравненно более интересной.

Таким образом, перед нами открывается мир гораздо богаче того, который представлял себе Паскаль, предполагавший одинаковое строение бесконечно малого и бесконечно большого, различающихся между собой только в масштабе. С этой точки зрения, мы на всех ступенях должны встречать одинаковые аспекты действительности, к которым приложимы одни и те же представления.

Вселенная, таким образом, может быть уподоблена тем куколкам, которые вставляются одна в другую, — абсолютно одинаковым, но все более и более уменьшающимся в размерах. К счастью, действительность оказывается гораздо богаче и несравненно интереснее. Каждая новая область, открывающаяся нам в результате успехов экспериментальных знаний, дает нам что-нибудь совершенно новое и требующее для своего объяснения творческого усилия теоретической мысли. Я глубоко убежден, что эти усилия должны быть направлены именно по тому пути, который привел нас к столь многим великим открытиям, и что, отказавшись от детерминистической концепции, наука лишится основного движущего начала, которое до настоящего времени определяло ее силу, — веры в познаваемость мира. Ничто в переживаемых нами трудностях не оправдывает и не требует изменения фундаментальных установок, что, по моему мнению, было бы равносильно отречению от всего того, что определяло завоевания науки в прошлом.

Для подтверждения своей точки зрения я хотел бы указать направление, по которому, по моему убеждению, должна итти наука для того, чтобы выбраться из тупика и осуществить

необходимый синтез. Несомненно, выйдя из временных затруднений, в которых мы сейчас находимся, и перейдя на более высокую ступень, мы столкнемся с новыми противоречиями, которые будут разрешены на основе еще более широкого синтеза. Именно таким путем будет итти мысль человечества в своем усилии постигнуть окружающий нас мир.

Мне кажется, что основной причиной всех наших современных трудностей является введение представления об индивидуальных частицах. Сущность принципа неопределенности заключается именно в утверждении невозможности проследить за движением отдельного электрона, т. е. невозможности представить его себе в качестве отдельного предмета. Поэтому единственным выходом являлся, по-моему, отказ от представления об индивидуальной частице, индивидуальном фотоне или электроне.

Именно произвольное введение представления об индивидууме повлекло за собой все эти парадоксальные выводы относительно индетерминизма и свободы выбора.

Здесь имеет место антропоморфная экстраполяция, совершенно ненужная и неоправдываемая опытом. Что касается меня, то я глубоко убежден, что в физике, как и в биологии, индивидуальность является следствием сложности структуры и что появление отдельного индивидуума возможно лишь на определенном структурном уровне. Индивидуализация, возможность опознать предмет и проследить его движение среди других обусловлены наличием известного минимума характерных особенностей, придающих экспериментальный смысл индивидуальности, а это, в свою очередь, предполагает наличие довольно сложной структуры. Мне кажется, что представление об индивидууме не имеет резкой нижней границы и выявляется с возрастающей ясностью по мере усложнения структуры.

Существует много различных аргументов, говорящих в пользу этого представления. Наиболее убедительным, на мой взгляд, является успех того, что мы называем новыми статистиками. Действительно, когда возникла потребность сделать выводы из атомной и молекулярной гипотез, то на первых порах в области физики для этого была использована кинетическая теория газов, в которой рассматриваются системы, состоящие из большого количества частиц. В зависимости от способа распределения частиц между различными состояниями, в отношении положения и движения, система, составной частью которой она является, может принимать различные конфигурации. Макроскопический вид такой системы представляет собой обычно среднее из всех этих конфигураций. Наоборот, при более детальном рассмотрении мы будем видеть то одну, то другую конфигура-

цию и сможем констатировать наличие в данной системе флюктуаций, подобных тем, которые являются причиной броуновского движения. Применяя к различным возможным конфигурациям исчисление вероятностей, мы получаем возможность предвидеть поведение сложной системы и имеющих в ней место флюктуаций. Вероятность каждой такой конфигурации, т. е. время, в течение которого она осуществляется, определяется с учетом всех многочисленных частичных элементов, входящих в состав системы. Именно эта оценка относительной вероятности отдельных конфигураций дает нам возможность предвидеть как усредненные эффекты, например, давление газа, так и отклонения от среднего т. е. флюктуации.

Одна и та же конфигурация системы, характеризующаяся некоторыми определенными значениями макроскопических параметров — механических или геометрических, служащих для ее определения, с точки зрения микроскопической, может осуществляться бо̀льшим или меньшим числом различных способов, путем соответствующего распределения составляющих его частиц. Если каждый из этих способов, каждый комплекс рассматривается априори как равновозможный, то вероятность данной конфигурации будет пропорциональна числу соответствующих комплексов.

Таким образом, можно вычислить вероятность каждой конфигурации и вывести из нее среднюю конфигурацию, а также и возможные отклонения или флюктуации. Эти соображения составляют основу статистической механики.

Творцы статистической механики Больтцман и Гиббс, рассматривая частицы, входящие в систему, как неотличимые одна от другой, все же приписывали им индивидуальность, так как они считали различными комплексы, отличающиеся друг от друга простой переменой мест двух одинаковых частиц. Таким образом, в статистической механике путем рассмотрения перестановок вычисляется так называемое «число комплексов», а следовательно, и вероятность каждой конфигурации для всей системы.

Интересно отметить, что предвидения этой статистики не подтверждаются опытом.

В настоящее время разработаны новые статистики: статистика Бозе — Эйнштейна и статистика Паули — Ферми, которые отличаются от статистики Больтцмана тем, что в них частицам не приписывается индивидуальность. Эти статистики считают, что распределение частиц между различными возможными состояниями может характеризоваться лишь числом частиц, а не их индивидуальностью. Два комплекса, отличающиеся между собой только перестановкой двух частиц, рассматриваемых как

отличимые одна от другой, не считаются различными. Это вносит изменение в статистику, так как в результате меняется число комплексов, соответствующих любой микроскопической конфигурации, а следовательно, и вероятность, приписываемая этой конфигурации. В новых статистиках индивидуальностью обладают только состояния, в которых могут находиться частицы, а не сами частицы.

Частица (название, которое, впрочем, следовало бы изменить) перестает быть отдельным предметом и превращается в степень возбуждения приписываемого ей состояния, причем, естественно, для определения комплекса существенным является только число степеней возбуждения, приписываемых каждому из возможных состояний.

Я хочу с помощью простого примера дать вам представление о глубоком различии между этими двумя статистиками, которое проявляется в различной вероятности, приписываемой различным микроскопическим конфигурациям, а следовательно, и различному предвидению, которое должно быть подвергнуто опытной проверке.

Представим себе сосуд, содержащий две молекулы одного и того же газа. Предположим, что сосуд разделен на две равные половины либо реальной перегородкой, снабженной отверстием, вследствие чего молекулы иногда могут переходить из одной части сосуда в другую, либо просто воображаемой перегородкой; в последнем случае переходы будут более частыми. Рассмотрим вероятность конфигураций, которые может принять такая система.

Пусть одно отделение будет справа, а другое слева. С точки зрения эксперимента, приписывание каждому из этих отделений особой индивидуальности вполне оправдано. Что же касается молекул, то я, — если буду рассматривать их в качестве отдельных предметов и припишу им особые индивидуальности, — обозначу одну из них через A, другую через B. Каждая из них имеет равные возможности находиться в правом или левом отделении. Если рассматривать обе молекулы как независимые одна от другой, то для их совокупности мы получим четыре возможных комплекса:

1) A и B будут находиться одновременно в правом отделении, а левое будет пусто;

2) A будет находиться справа, а B — слева;

3) наоборот, A будет слева, а B — справа;

4) наконец, A и B будут находиться слева.

Эти четыре единственные возможности должны априори считаться одинаково вероятными.

Следовательно, мы имеем две возможности: молекулы одина-

ково распределятся между обоими отделениями, и обе они будут находиться либо справа, либо слева.

Физически это выразится следующим образом: в первую половину времени опыта газ будет распределен равномерно между обеими частями сосуда, затем четверть времени он будет весь сосредоточен в правом отделении и наконец последнюю четверть времени — в левом. В этой статистике первая конфигурация оказывается вдвое вероятнее двух остальных, так как ей соответствует два комплекса, отличающихся друг от друга перестановкой молекул A и B.

Полученные результаты могут быть использованы для исследования того, что можно назвать флюктуациями вокруг средней конфигурации, соответствующей равным плотностям в обоих отделениях. Нетрудно найти, что среднее квадратичное отклонение, равное корню квадратному из среднего квадрата отклонений, равно для каждого отделения $\frac{1}{\sqrt{2}}$ молекулы.

Признаюсь, когда мне приходилось излагать эту статистическую механику перед моими слушателями в Коллеж де Франс, меня всегда несколько смущала непоследовательность, с которой мы, с одной стороны, утверждаем, что частицы тождественны и, следовательно, не различимы между собой, а с другой — приписываем им индивидуальность для оценки числа комплексов; это приводит к тому, что комплексы *2* и *3* рассматриваются как различные, хотя из первого допущения и вытекает, что они не отличаются друг от друга и что, таким образом, различие между ними, с экспериментальной точки зрения, не имеет никакого смысла.

В физике существует одно очень здравое положение, которое, в частности, оказало неоценимые услуги Эйнштейну при разработке им теории относительности. Оно гласит: теория не должна содержать ничего такого, что не имело бы экспериментального смысла и не соответствовало бы опыту, если и не легко осуществимому, то хотя бы воображаемому. Данное правило применимо как раз к новым статистикам, которые с этой точки зрения имеют значительные преимущества перед прежней. Ибо, так как мы не способны отличить молекулу A от молекулы B, следует предположить, что имеется только один способ равномерного распределения газа между обоими отделениями. С этой точки зрения, мы должны рассматривать только число молекул, находящихся в каждом отделении, что дает нам три одинаково вероятные возможности: 1) две молекулы слева и ни одной справа; 2) одна слева и одна справа и 3) ни одной слева и две справа. Обратите внимание, что, рассуждая так, мы уже не рассматриваем молекулы как отдельные предметы и обращаем

внимание только на отделения и число молекул, находящихся в каждом из них. В данном случае молекулы фигурируют только в качестве степеней заполнения каждого из отделений, степеней того, насколько возбуждено состояние, представляемое каждым отделением.

Согласно новым представлениям, каждая из трех возможностей должна быть реализована в течение трети времени, и, следовательно, вероятность того, что газ будет равномерно распределен между обоими отделениями, будет равна не половине, а трети.

Новая статистика более выгодна, чем прежняя, для распределений, отклоняющихся от средней конфигурации, и поэтому она дает возможность предвидеть более значительные флюктуации.

Действительно, если с помощью новых значений вероятности вычислить среднее квадратичное отклонение в каждом отделении, то мы найдем, что оно равно $\sqrt{\frac{2}{3}}$ молекулы, а не $\sqrt{\frac{1}{2}}$ молекулы.

Только опыт может сказать, как ведет себя природа — так ли, как предполагает теория, индивидуализирующая отдельные частицы, или же, наоборот, в соответствии с теорией, индивидуализирующей только отделения и состояния, в которых могут находиться молекулы. Едва ли стоит говорить, что правильной оказывается вторая концепция, которая не противоречит себе, утверждая, что частицы неразличимы, и вместе с тем не учитывает их перестановок.

Очень интересно проследить экспериментальные следствия новой статистики Бозе — Эйнштейна, заменившей перестановки сочетаниями. Бозе применил ее к фотонам. То, что известно под именем теории Дебая для случая излучения черного тела, есть не что иное, как одна из форм применения этой статистики.

В примере, приведенном выше, я для простоты рассматривал только два отделения. Можно представить себе гораздо большее число отделений и — чтобы охарактеризовать возможные состояния частиц — учитывать не только изменение положений при переходе из одного отделения в другое, но и изменения скорости и количества движения. Это приводит нас к представлению о «фазовом пространстве», разделенном на отделения, или ячейки, каждая из которых имеет конечные размеры, определяемые постоянной h Планка и соответствующие одинаково вероятному состоянию. Для характеристики комплекса статистика Бозе — Эйнштейна пользуется только числом частиц, занимающих каждую ячейку, причем частица играет роль степени

возбуждения состояния соответствующей ячейки, а не роль отдельного предмета.

Прилагая это рассуждение, например, к электромагнитному излучению, находящемуся в тепловом равновесии в сосуде, можно найти экспериментальное распределение излучения черного тела. Это излучение можно представить, как сделал Джинс, в виде совокупности стоячих электромагнитных волн, из которых каждая соответствует одной ячейке фазового пространства, одному из возможных состояний фотона внутри сосуда.

Если предположить, что различным состояниям соответствуют возбуждения прерывного характера, обусловленные присутствием целого числа фотонов в каждом состоянии, то, применяя новую статистику, мы приходим к формуле Планка, подтвержденной опытом, между тем как, предполагая индивидуальность у фотонов и применяя к излучению черного тела статистику Больтцмана — Гиббса, мы приходим к формуле Вина, противоречащей данным опыта.

Повидимому, сказанное остается справедливым также и для газов. Применение статистики Бозе — Эйнштейна к молекулам газа дает возможность предвидеть вырождение газа, т. е. отклонения от закона идеального газа, которые в случае обыкновенных газов не могут быть проверены экспериментально.

При переходе от фотонов, атомов или нейтральных молекул к электронам статистика Бозе — Эйнштейна оказалась несостоятельной и была заменена другой; последняя также отрицает индивидуальность отдельных электронов, но она, кроме того, вводит дополнительное представление, так называемый принцип запрета Паули, в силу которого каждое возможное состояние электрона, каждое стационарное состояние электронных волн де Бройля или Дирака может соответствовать либо нулю, либо одному электрону. В электронной ячейке фазового пространства в отделении, соответствующем каждому из этих возможных состояний или стационарных волновых модусов, может находиться самое большее один электрон, так что возможно либо нулевое возбуждение, либо одна степень возбуждения.

Принцип запрета Паули сводится, таким образом, к утверждению взаимной непроницаемости электронов в соответствующем фазовом пространстве, между тем как у фотонов ничего подобного не наблюдается.

Ячейки, соответствующие отрицательным энергетическим состояниям Дирака, о которых я уже упоминал, нормально заполнены по всему пространству электронами. Когда одна из этих ячеек делается свободной, уровень ее возбуждения становится равным нулю, в результате чего мы имеем «дырку», или пози-

трон. Наличие в металлах свободных электронов объясняет их электропроводность, так же как и другие свойства, в частности диамагнетизм и не зависящий от температуры парамагнетизм некоторых металлов.

Прилагая к свободным электронам статистику Паули, удалось объяснить это явление, долгое время остававшееся загадкой для физиков. Важность победы новой статистики для нас несомненна, ибо она представляет собой еще одно экспериментальное доказательство в пользу утверждения, что фотоны, электроны и протоны не могут рассматриваться в качестве отдельных предметов, а это, в свою очередь, полностью подтверждает те выводы, которые я считаю необходимым сделать из принципа неопределенности.

В этой связи не менее важно другое соображение: постоянная h Планка интерпретируется как величина, фиксирующая границы области, в которой господствует индетерминированность и где даже чисто статистические законы причинности теряют свою приложимость. Эта индетерминированность кажется мне удивительно детерминированной, если учесть, что постоянная h известна нам с точностью до тысячной.

Проявление h, которое, повидимому, лежит в основании всех фундаментальных законов природы и с которым связано столь много важнейших явлений, должно, казалось бы, стимулировать стремление узнать что-нибудь больше о том, что собой представляет эта константа, а не складывать руки и вообще отказываться от научного подхода в тот момент, когда он более всего необходим и может оказаться исключительно плодотворным. Мне кажется, недостаточно сказать, что «h определяет индетерминированность». Успехи волновой механики лишний раз доказывают нам необходимость оставаться верными основному принципу физического исследования, заключающемуся в непрерывном и неуклонном движении вперед в исследовании детерминизма.

* * *

На основании всего вышесказанного можно заключить, что состояние современной физики должно быть признано вполне удовлетворительным. Мы обладаем громадным и все усиливающимся запасом новых экспериментальных фактов. Большая часть из них уже классифицирована, причем разработаны возможности точного предвидения, которые, хотя и могут быть названы статистическими, тем не менее далеко превосходят все то, что мы могли себе представить.

На практике наша наука в своем развитии использует попеременно то волновые, то корпускулярные представления. Есть

обширная область, в которой мы с полным правом употребляем концепцию частиц, подтверждая наши теоретические построения прекрасными фотографиями Вильсона. С другой стороны, мы с тем же основанием можем пользоваться волновыми представлениями, и в этом случае наши построения находят подтверждение в прекрасных снимках дифракции электронных волн.

Вместе с тем не следует забывать, что дальнейшее развитие этих представлений наталкивается на величайшие затруднения, которые как по форме, так и по существу связаны с введением в субатомную область представления об индивидуальной частице. В своем изложении я пытался показать, что только отказ от этой концепции, в сильной степени насыщенной идеями антропоморфизма, или коренная их переработка могут обеспечить необходимый синтез, способный объяснить одновременно корпускулярный и волновой аспекты реальности.

Наличие этих трудностей, возрастающих в соответствии с уже достигнутыми или еще предстоящими завоеваниями, не должно нас удивлять. Мы вынуждены пользоваться привычным оружием из умственного арсенала, накопленного в течение ряда веков, имея перед собой задачу интерпретации целого мира совершенно новых фактов, связанных с областью физики атома.

Между тем за этой областью перед нами открывается другая столь же неведомая область физико-химии ядра, и мы убеждаемся, что то, что было справедливо в первой, оказывается уже неприложимым во второй, в частности, поскольку дело идет об электронах. Возможно, что в этой новой области нас ожидает не меньше сюрпризов, чем при переходе от макроскопической физики к физике атома. Это означает, что необходимость создать новые орудия, подобно тому как предшествующие поколения создавали орудия, которыми мы пользуемся в настоящее время. Созданные ими представления кажутся нам простыми и конкретными только потому, что мы к ним привыкли. Однако на самом деле это — нередко лишь иллюзия. Концепция изолированного объекта по существу представляет собой величайшую абстракцию; она является синтезом, произведенным предшествующими поколениями из огромного количества разнородных явлений и ощущений — различных и иногда даже противоречивых, ощущений осязания и ощущений зрения, индивидуальных и коллективных. Концепция отдельного объекта позволяет нам не только сгруппировать и синтезировать данные индивидуального опыта, но также и сообщать их друг другу, сравнивая и очеловечивая, таким образом, наши представления.

Когда я смотрю на какой-либо предмет, то представление о нем вызывает в моем сознании тот аспект, который этот же предмет может иметь для Перрена и, возможно, значительно

отличается от моего представления. Здесь мы имеем дело с построением, которое вначале представляло собой абстракцию и конкретность приобрело только с течением времени, по мере пользования им. Конкретное есть не что иное, как абстракция, ставшая привычной. Концепция отдельного предмета, бывшая вначале абстракцией, произвольно выхваченной из вселенной, стала для нас настолько привычной, что, по мнению многих, без нее невозможно представить себе картины мира. Некоторые полагают, что частица, т. е. доведенное до предела представление об отдельном предмете, лежит и всегда будет лежать в основе наших представлений о реальности. Что касается меня, то я более оптимистически оцениваю творческие возможности нашей умственной эволюции.

Долговременное пользование ведет к конкретизации. В результате привычки, создаваемой длинным рядом поколений, конкретизируется не только представление изолированного объекта; в настоящее время мы можем видеть, как по мере создания привычных ассоциаций и образов постепенно конкретизируются даже чрезвычайно абстрактные и трудно ассимилируемые концепции.

В качестве примера я воспользуюсь понятием о потенциале. В дни моей юности о нем не было и речи; затем о нем стали изредка упоминать, правда, с большой осторожностью. Мой предшественник по кафедре в Коллеж де Франс проф. Маскар первым ввел его в читаемый им курс, за что был осмеян аббатом Муаньо в журнале «Космос», в котором Маскар был назван Донкихотом и рыцарем потенциала. Теперь это представление подкреплено необходимыми знаниями, мы с ним свыклись; и когда мы говорим о разности потенциалов между двумя электрическими полюсами, мы хорошо понимаем, о чем идет речь. Это представление ассоциируется в нашем сознании с рядом интеллектуальных или физиологических опытов, которые конкретизируют то, что раньше абстрактно определялось интегралом, взятым вдоль линии между двумя точками поля. Любой электромонтер теперь прекрасно знает, что это представление о величине, измеряемой в вольтах, связано с тем, что при определенных условиях он может быть поражен ударом в момент прикосновения к полюсам и что лампа, помещенная между ними, накаливается докрасна, светится или перегорает, а вольтметр показывает отклонение. Электромонтер настолько свыкся с конкретными проявлениями разности потенциалов, что даже придумал для нее специальное жаргонное словечко — «сок» (jus); а это с очевидностью доказывает, что данное представление потеряло для него всякую абстрактность.

С подобными же трудностями встретилось в дни моей юности введение в научный обиход понятия об энтропии. Эта кон-

цепция впервые появилась в абстрактной форме интеграла, взятого по замкнутому контуру.

Очень долго энтропия оставалась пугалом для физиков. Теперь это понятие стало для нас привычным, с одной стороны, благодаря статистической интерпретации, как меры вероятности состояния системы, с другой — вследствие использования паров воды в технической термодинамике; основанное на энтропийной диаграмме, использование паров воды способствовало конкретизации этого понятия в сознании инженеров, которые могут проследить его эволюцию на протяжении ряда превращений работающей жидкости или химической системы.

Атомной и ядерной физике предстоит пережить аналогичный процесс. Максимально используя интеллектуальное оружие, перешедшее к нам от предшествующих поколений, мы должны быть уверены в том, что, в результате длительных столкновений с опытом, потенциальные представления, содержащиеся в уравнениях новой динамики, а также те, которые могут быть введены в будущем, постепенно обрастут конкретными представлениями.

Выше я упоминал о ряде индивидуализируемых состояний. Их можно представить в виде совокупности стационарных вибраций или ячеек фазового пространства, которые могут быть возбуждены или заполнены прерывным образом; каждая из них соответствует присутствию одной частицы, причем две одинаковые частицы так же неотличимы одна от другой, как две последовательные ступени возбуждения. Конечно, все это звучит еще довольно абстрактно. Мне представляется, однако, что, идя по этому пути, нам удастся постепенно выработать стройную, логическую концепцию, в которой индивидуум займет подобающее ему место и с помощью которой мы избегнем затруднений, связанных с пользованием старой статистикой, планетарной концепции атома и принципом неопределенности. А главное, нужно не терять веры в способность человеческого ума приспособляться к обстоятельствам, способность, столько раз проверенную на опыте.

Я стремился дать вам живую картину положения физики на сегодня, со всеми ее светлыми и темными сторонами. К счастью, света очень много, а тени таят в себе богатые возможности. И мы должны быть благодарны тем, кто углубляется в эти неведомые области для открытия еще неизведанных возможностей и создания более тонких и мощных орудий познания действительности.

ПЯТЬДЕСЯТ ЛЕТ РАЗВИТИЯ НАУКИ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ *

Используя все более сложные и тонкие методы, экспериментальная наука наблюдает и открывает факты, которые затем с помощью теории, прибегающей во все возрастающей степени к помощи математики, приводятся в порядок и классифицируются, подготовляя путь для дальнейших обобщений, которые, в свою очередь, предвосхищают опыт и указывают ему путь к новым, еще не открытым областям. Теория превращает новые факты в новые истины и новые принципы, стремясь построить все более полную, точную, гармоничную и полезную картину мира. Для техника и изобретателя, приходящих в новые области с целью использования скрытых в них богатств, а также, я сказал бы даже, в особенности, для туриста, желающего насладиться их красотами, теория создает все более точную и подробную карту завоеванных областей, карту, на которой область terra incognita постепенно сокращается. В благодарность за все богатство предоставленных ей возможностей, техника, приобретающая все возрастающую самостоятельность, со своей стороны способствует дальнейшему развитию исследования. Используя ресурсы завоеванных областей, она создает все более и более совершенное оружие для отряда, идущего впереди.

Таковы в интересующей нас области возможности, предоставляемые в наше распоряжение электрической промышленностью в виде огромной мощности напряжений, которые в недалеком будущем достигнут десятков миллионов вольт, а также магнитных полей, примерами которых может служить электромагнит Бельвю или магнит Капицы мощностью в 400 000 гаусс.

Необычайно быстрое развитие лампы с тремя электродами предоставило в распоряжение физиков усилители все возрастающей мощности и чувствительности. По своему значению для современной науки изобретение трехэлектродной лампы может быть поставлено наравне с открытием микроскопа для оптики XVI столетия.

Наконец, техника сжижения газов и низких температур дает в руки исследователя совершенно новые возможности, снабжая

* Из журнала «Atomes», № 11, 1947 г. Статья воспроизводит текст, относящийся к 1933 г. — *Прим. ред.*

его редкими газами высокой чистоты или давая ему возможность работать при температурах, приближающихся к абсолютному нулю. В результате в этой области были сделаны важные и совершенно неожиданные открытия, как, например, открытие в настоящее время еще почти неисследованного явления сверхпроводимости *. Прежде чем обратиться к изучению интересующего нас периода, посмотрим, каково было положение в начале 1883 г., ровно сто лет после открытия Кулоном законов, носящих его имя **.

---

* То есть исчезиовение при очеиь низких тепературах электрического сопротивления у металлов. В последние годы советским физиком П. Капицей было открыто еще сдио приицииальио важное явлеиие — явлеиие сверхтекучести ожижеииых газов. Оио наблюдалось в жидком гелии при температуре, очеиь близкой к абсолютиому нулю. — *Прим. ред.*

** Существенным недостатком этой статьи проф. Ланжевеиа является отсутствие показа огромиой роли русских учеиых в развитии науки об электричестве. В силу этого нсторическая часть статьи приобретает одностороиний и неточный характер.

Русские учеиые-физики со времен М. В. Ломоиосова виесли неоценимый вклад в развитие науки об электричестве, прокладывая новые пути, создавая новые методы исследоваиия, указывая новые области для практических приложений научиых достижеиий. Невозможно в коротком примечаиии исправить этот недостаток статьи Лаижевена. Но нельзя не отметить хотя бы иекоторые его иаиболее вопиющие промахи.

Лаижевеи упомииает закоиы Ома и Джоуля, не иазывая имеин русского учеиого Э. Х. Леица, работы которого по изучеиию теплового действия тока значительно превосходили по своей точиости опыты Джоуля и которому по праву прииадлежит приоритет в установлеиии закоиа, определяющего количество выделяемого током тепла. В статье упомииаются имеиа Голарда и Гиббса, трудившихся иад созданием траисформаторов перемеиного тока, но остается иеосвещеиным тот факт, что проблема траисформации перемеиных токов еще до того была решена П. Н. Яблочковым и И. Ф. Усагииым, а осиовы совремеииой техники перемеииых трехфазиых токов были разработаиы М. О. Доливо-Добровольским. Эдисон фигурирует как изобретатель лампочки иакаливаиия, хотя иа самую возможность примеиеиия накаливающего действия электрического тока для целей освещеиия впервые указал русский физик В. В. Петров, а первую в мире практически действующую электрическую лампочку иакаливания создал А. Н. Лодыгии; с коиструкцией лампочки Лодыгина Эдисон познакомился до начала своих работ.

В статье безымяиио указывается иа развитие электрического телеграфа, хотя следовало бы ясно указать, что родииой электрического телеграфа была Россия. Еще до опытов Депре русский иижеиер-электротехник Д. А. Лачинов теоретически обосиовал возможность передачи энергии на большие расстояиия с помощью электрического тока. Но имя Лачииова вовсе не упоминается Лаижевеном. Мы ие находим также имеии изобретателя радио А. С. Попова, имеии П. Н. Лебедева, классические опыты которого по измереиию светового давлеиия окончательио убедили крупиейших западиоевропейских физиков в справедливости электромагнитной теории света. Только недостаточиой осведомлеииостью Лаижевеиа в области истории русской науки можио объясиить тот факт, что он ии слова не говорит о работах русского физика Н. А. Умова, разработавшего представлеиие о движении энергии, о работах В. А. Михельсоиа и Б. Б. Голицыиа, подготовлявших квантовую теорию нзлучения, о замечательных нсследоваииях А. Г. Столетова, не только создавшего первый в мире фотоэлемент, но и

В течение этого столетия была исследована и нанесена на карту обширная область. Эта работа основывалась на законах, из которых некоторые, например закон Лапласа в области электромагнетизма или закон Ампера в области электродинамики, были, подобно законам Ньютона и Кулона, законами мгновенного действия на расстоянии. Другие, как законы Ома и Джоуля, носили скорее энергетический и более определяющий характер. Наконец, может быть самый важный из всех, закон индукции Фарадея лег в основу тех практических применений, которые в 1883 г. открыли собой эпоху электрификации мира. Это было в то время, когда Марсель Депре в Париже производил опыты по передаче энергии на расстояние с помощью динамо постоянного тока, а Голард и Гиббс в Лондоне — над трансформатором переменного тока. Телеграф уже покрывал сетью кабелей и проводов поверхность суши и дно океанов, а недавно изобретенный телефон внес радикальные изменения в повседневную жизнь.

Теоретические положения, легшие в основу двух последних отраслей техники и обеспечившие их дальнейшее развитие, были уже полностью разработаны Пупином и Хевисайдом и, как показал Кирхгоф еще двадцать лет назад, давали возможность изучить все вопросы, связанные с распространением телеграфных и телефонных сигналов на поверхности и даже внутри проводов.

* * *

Таким образом, постепенно создавалась «нервная» система нашей планеты, организованная и одушевленная человеком.

Так подготовлялось постепенное овладение таинственными силами электричества и магнетизма, которые, не оказывая никакого непосредственного воздействия на наши органы чувств, способны создавать тончайшие эффекты и переносить колоссальные мощности силами, которые по справедливости могут быть названы рассеянной и хаотически неупорядоченной душой природы.

В этот период наука, в предвидении стоящих на очереди огромных технических задач, стремится стабилизировать и привести в систему уже собранный материал, чтобы сделать для техника более очевидными и доступными схемы, созданные теорией.

На конгрессе, состоявшемся за два года перед тем в Париже, была принята международная система электрических единиц.

установившего чрезвычайно важные закономерности фотоэффекта.

Относясь критически к этой стороне статьи Ланжевена, читатель тем не менее найдет в ней много ценного для характеристики путей развития современного учения об электричестве. — *Прим. ред.*

Сложная задача создания эталонов, соответствующих новым единицам, и разработка методов измерения различных величин, число которых непрерывно возрастало, была поручена ряду наиболее крупных ученых различных стран. Франция была представлена Маскаром, роль которого в 1881 г. была очень значительна *. Основная задача в этот период состояла не в завоевании новых областей, а в организованном и систематическом освоении уже занятых территорий.

Деятельность двух наиболее блестящих представителей физики того времени — Вильяма Томсона и Гельмгольца — подходила к концу. Во Франции два крупных и оригинальных исследователя работали в узких областях, недавно ими открытых: Габриэль Липпман заканчивал серию своих работ по электрокапиллярности и создавал ртутный электрометр, с таким успехом применяющийся в настоящее время в электрохимии, и Пьер Кюри, в то время молодой человек 24 лет, совместно со своим братом Жаком был занят исследованиями в области электричества, за которыми последовал ряд работ по изучению магнетизма и явлений, завершившихся открытием радиоактивности, в котором он сыграл крупнейшую роль.

* * *

Спокойствие было, однако, только кажущимся. Это было временное затишье перед новым наступлением, перед эпохой великих открытий, в которых приняло участие мое поколение и предшественников которой, за небольшим исключением, следует искать за пределами Франции.

За четыре года перед тем Крукс опубликовал свои ныне знаменитые работы, посвященные исследованию катодных лучей. В противоположность общепринятому мнению, он рассматривал эти лучи как новую форму материи, так называемую лучистую материю, не догадываясь, однако, что в трубке, названной его именем, под действием электрического разряда из недр материи возникает в чистом виде один из двух электрических флюидов, которые со времен Фарадея перестали привлекать внимание исследователей.

Столь же непопулярны были в то время атомистические представления, хотя их авторы упорно не желали сдаваться. Еще в 1882 г. Гизе, перенося на газы представления, развитые Клаузиусом применительно к электролитам, выдвинул теорию, в которой пытался объяснить электропроводность пламени присутствием ионов, т. е. заряженных атомов и молекул того или другого

* Представителем от России был крупнейший русский физик А. Г. Столетов. По его предложению конгресс выбрал за единицу сопротивления тот эталон ома, которым мы пользуемся и поныне. — *Прим. ред.*

знака, и движением ионов различных знаков в противоположных направлениях под действием электрического поля.

В том же году Эдисон наблюдал в лампе с угольной нитью явление, природы которого он так и не понял, а именно — утечку тока, вызываемую эмиссией отрицательного электричества нагретыми электродами и известную в настоящее время под названием термоионной эмиссии. Это явление теперь используется в электронных лампах; оно определило собой колоссальное развитие радиотехники и радиовещания.

* * *

В области теории Клерк Максвелл за десять лет до своей преждевременной смерти опубликовал первое издание своего знаменитого трактата *, этой библии современного электромагнетизма. Его фундаментальное исследование, столь богатое глубокими мыслями, было настолько трудно для понимания, сложно и подчас даже противоречиво, именно благодаря богатству новых идей, что понадобилось продолжительное время и, главное, экспериментальное подтверждение со стороны исследований Герца, чтобы выявить в полной мере его сущность и оценить гениальное предвидение его автора.

Сущность же трактата Максвелла состояла не более, не менее, как в новом и окончательном формулировании законов электромагнетизма с одновременным утверждением электромагнитной природы света. Это была большая и неожиданная победа в объяснении оптики посредством электричества, — в том вопросе, в разрешении которого механика потерпела полное крушение.

Однако нашлись ученые, сразу оценившие все значение теории Максвелла и своими работами способствовавшие ее дальнейшему развитию.

Начиная с 1872 г., Оливер Хевисайд, почти ни с кем не общаясь, был занят исследованиями, все значение которых выяснилось только после их опубликования в 1890 г. и в которых идеи Максвелла получили дальнейшее развитие и значительное дополнение. Хевисайд изучил до Пойнтинга вопрос о распространении энергии в электромагнитном поле ** и, предвосхищая Герца, придал современную форму общим уравнениям распространения волн в материальной покоящейся системе. Первое эксперимен-

* «Treatise of Electricity and Magnetism». Первое издание вышло в Лондоне в 1873 г. (Максвелл умер в 1879 г. Ланжевен, повидимому, ошибается в дате, говоря, что «Трактат» вышел за 10 лет до смерти Максвелла.) — *Прим. ред.*

** Вопрос о распространении энергии впервые поставил и разрешил русский физик Н. А. Умов (1846—1915), профессор Московского университета. Еще в 1874 г., за 10 лет до Пойнтинга, Умов вывел уравнения движения энергии применительно к твердым и жидким телам. Пойнтинг же развил эти идеи применительно к электромагнитному полю. — *Прим. ред.*

тальное подтверждение новой теории было дано Роуландом, который в 1876 г. показал, что движения наэлектризованного тела, т. е. перемещения электрического заряда, известные под названием конвекционных токов, производят на находящийся по соседству магнит действие, аналогичное действию обычного тока, численная величина которого согласуется с величиной, предсказанной теорией *. Габриэль Липпман, учитывая обратное действие на наэлектризованное тело магнитного поля, порожденного движением заряда, в 1879 г. пришел к выводу о существовании инерции электричества и, таким образом, на два года опередил Дж. Дж. Томсона, который, тогда еще совсем молодой человек, в своей знаменитой работе, опубликованной в 1881 г., предвидел и дал точную оценку дополнительной инерции, возникающей в движущемся заряженном теле благодаря заряду, который оно несет **.

Это открытие явилось первым шагом на пути объяснения механики с помощью электричества.

В 1883 г. Гельмгольц, со своей стороны, хотя и несколько иным образом, подготовлял будущее развитие физики.

По его предложению, Берлинская Академия наук объявила премию за работу, содержащую экспериментальное подтверждение выводов теории Максвелла, согласно которой существование и распространение электромагнитных волн подчиняются тем же законам, что и световые волны. Вызов был подхвачен Герцем и оказал решающее влияние на дальнейшее течение событий.

* Тот факт, что магнитное поле образуется около проводника, по которому течет ток, был известен давно. Теория Максвелла подразумевала, что конвекционные токи тоже должны вызывать магнитное поле, и это действительно было подтверждено опытами Роуланда. Однако нельзя сказать, что опыты Роуланда являлись решающим подтверждением новой теории: центр тяжести теории Максвелла лежал в утверждении, что магнитное поле возбуждается не только движениями зарядов (в том числе и конвекционными токами), но и так называемыми «токами смещения», иначе — изменениями электрического поля.

Магнитное поле токов смещения, возникающих в диэлектрике, было экспериментально обнаружено лишь в 1908 г. опытами крупного русского физика А. А. Эйхенвальда. — *Прим. ред.*

** Всякое электрически заряженное тело обладает большей инерцией, чем то же тело в незаряженном состоянии. Это легко уяснить себе, если учесть, что для придания заряженному телу скорости v му необходимо сообщить кинетическую энергию $\frac{mv^2}{2}$ и, кроме того, еще некоторую дополнительную энергию, идущую на создание магнитного поля, сопровождающего всякий движущийся заряд. Избыток инерции, возникающий у движущегося заряженного тела по сравнению с таким же незаряженным телом, носит, в силу своего происхождения, название «электромагнитной массы».

Понятие электромагнитной массы было впервые введено Дж. Дж. Томсоном в 1881 г. в статье «Об электрических и магнитных эффектах, обусловленных движением электрически заряженных тел». — *Прим. ред.*

Наконец, за два года перед тем Майкельсон опубликовал результаты своего знаменитого опыта, поставленного с целью доказать движение Земли относительно светового эфира. Не веря своим глазам и не зная, как истолковать полученные результаты, он работал над дальнейшим повышением и без того необычайной точности своих приборов, подготовляя таким образом, сам того не подозревая, основную предпосылку релятивистской революции, разразившейся двадцать лет спустя *.

* * *

Рассмотрение истории развития учения об электричестве за последние 50 лет выявляет наличие двух самостоятельных направлений, причем взаимодействие между опытом и теорией в обоих направлениях выглядит совершенно различно. В первой серии исследований, которая начинается открытием катодных лучей и, проходя через лучи Рентгена, ионизацию газов и радиоактивность, заканчивается открытием нейтрона и положительного электрона, решающую роль играет эксперимент. Эксперимент идет впереди теории, руководясь интуицией, иногда, правда, несколько наугад, но делая на своем пути неожиданные и плодотворные открытия. Второе направление исследований, начинающееся работами Максвелла, проходит через Герца, Лоренца, Эйнштейна, Планка и Бора и заканчивается Луи де Бройлем и Дираком; руководящая роль в этом направлении принадлежит теории, указывающей путь опыту. Здесь движущим началом является теоретическая мысль, стремящаяся к логическому осмысливанию и синтезу, ясности и единству. Этот путь также богат неожиданностями и сильными переживаниями; достаточно вспомнить бурные кризисы, связанные с появлением теории относительности и теории квант. Однако связь между обоими направлениями никогда полностью не прерывалась, развитие их шло параллельно на основе самого тесного взаимодействия. Выйдя из двух различных точек, оба отряда постепенно все более и более сближались, пока, наконец, в самое последнее время не соединили своих усилий в исследовании атомного ядра.

В начале первого пути мы встречаемся с одним из тех технических открытий, которые, хотя и кажутся нам незаметными, однако играют громадную роль в развитии науки. В своих исследованиях над электрическим разрядом в разреженных газах Фарадей не смог пойти дальше и остановился ввиду отсутствия приборов для получения достаточно высокого вакуума и, в част-

* Результаты опыта Майкельсона являлись предметом длительной дискуссии. Некоторые ученые подвергали сомнению результат этого опыта. См. об этом: *С. И. Вавилов*, Экспериментальные основания теории относительности, 1928 г. — *Прим. ред.*

ности, ввиду невозможности получения вполне герметических стеклянных сосудов, снабженных электродами. Только в 1860 г. Гейслер, работавший в качестве стеклодува в различных немецких лабораториях, нашел способ впаивания металлических электродов в стенки стеклянных сосудов и тем самым мог сохранять в течение любого времени вакуум, полученный с помощью ртутного насоса. Опыт показал, что получение таких крайне разреженных газов является необходимым условием, позволяющим вырвать у природы одну из ее важнейших тайн: освободить из металла заключенный в нем электрический флюид и изучить его свойства. В 1860 г. Плюккер наблюдает зеленую флюоресценцию, вызванную этим флюидом на стенке ампулы, противоположной катоду, и поручает исследование этого явления своему ученику Гитторфу. Последний в 1869 г. наблюдает отклонение электрического флюида под действием магнита. В 1876 г. появление резкой тени, отбрасываемой на стенке ампулы экраном, помещенным между нею и катодом, заставляет Гольдштейна приписать это явление излучению, исходящему от катода, которому он дает название *катодного излучения*. В 1871 г. Варлей и, более отчетливо, Крукс выдвигают необычное представление о потоке заряженных материальных частиц, испускаемых катодом, объясняя их отклонение при действии магнитного поля на основе теории Максвелла и опытов Роуланда, предсказавших подобное отклонение для конвекционных токов.

Такая концепция лучистой материи, недостаточно точная и чисто качественная по своему характеру, до 1895 г. оставалась непризнанной, да она и не могла встретить общего признания в эпоху расцвета позитивизма и господства энергетики, когда Вильгельм Оствальд, выступая против моего учителя Марселя Бриллюена, провозглашал «крушение современного атомизма». Взгляд, что катодные лучи (объяснить отклонение которых в магнитном поле было трудно) представляют собой излучение, более или менее сходное со светом, нашел в 1892 г. некоторую опору в открытии Герца, установившего, что катодные лучи способны проходить через тонкую металлическую фольгу, совершенно непроницаемую для воздуха. Результаты Герца были подтверждены и развиты дальше Ленардом. Если бы Ленард более тщательным образом выделил пучок катодных лучей и поместил бы фотографическую пластинку по ту сторону металлического экрана, ему удалось бы осуществить на 25 лет раньше опыт Дж. П. Томсона и получить дифракционные кольца, предсказанные в настоящее время волновой механикой, что значительно укрепило бы позиции антиатомистической концепции.

Возможно, что весь ход развития нашей науки пошел бы по иному пути, и мы должны быть благодарны судьбе за эту ошибку, как мы благодарны ей и за ту неточность в вычислениях

Тихо Браге, которая, маскируя эффект взаимных возмущений планет, позволила Кеплеру найти простые законы, управляющие их движением *.

* * *

Как бы то ни было, но пришлось ждать 12 лет, пока первый отряд исследователей смог двинуться в путь. Это стало возможным в результате двух открытий. Во-первых, Жан Перрен в работе, положившей начало его исследовательской деятельности, доказал перенос заряда катодными лучами, окончательно подтвердив, таким образом, их материальную или корпускулярную природу. Вторым и притом более важным обстоятельством явилось открытие Рентгена, показавшего, что различные тела при падении на них катодных лучей испускают какое-то новое излучение, не подверженное, подобно свету, электрическим и магнитным воздействиям, но зато обладающее совершенно новыми свойствами. Это было событие первостепенной важности, которое зимой 1895 г. вызвало подъем замечательной деятельности в наших лабораториях и повлекло за собой ряд открытий, не законченный и поныне. Первое из этих открытий последовало очень скоро. Я имею в виду открытие дискретного зернистого строения электрических зарядов и отрицательного электрона, с одной стороны, и радиоактивности — с другой.

* * *

Одно из наиболее замечательных свойств рентгеновских лучей — их способность при прохождении через газы превращать последние в проводники электричества — дало возможность точно исследовать прохождение электричества через газы и подтвердило гипотезу существования ионов в газе, выдвинутую Гизе за 15 лет перед этим. Предсказанный теорией и открытый Вильсоном факт, что при расширении газа в камере, носящей его имя,

---

* Тихо Браге (1546—1601) — знаменитый датский астроном. В течение десятков лет он производил точнейшие для своего времени наблюдения над положениями небесных светил. Однако астрономические инструменты его времени не могли обеспечить большой точности (зрительная труба изобретена уже после смерти Тихо Браге), и поэтому числовой материал, полученный Тихо Браге, не отражал тех возмущений, которые возникают в движении какой-либо планеты из-за наличия других планет.

Тихо Браге завещал Кеплеру, работавшему в качестве его помощника, составить на основе его наблюдений новые таблицы планетных движений. Степень точности, которой обладали наблюдения Тихо Браге, позволила Кеплеру обнаружить, что планеты движутся по эллипсам, а также установить два других закона относительно времен обращения планет вокруг Солнца.

Законы Кеплера, не отражающие взаимных возмущений планет, составляют, однако, и поныне основу теоретической астрономии как необходимое первое приближение в астрономических расчетах. — *Прим. ред.*

ионы, присутствующие в газе, насыщенном парами воды, играют роль центров, на которых конденсируются водяные капельки, дал возможность наблюдать каждый из этих носителей электрических зарядов и измерить величину заряда; причем достигнуть этого удалось сначала путем исследования всего тумана, как это сделал Таунсенд, а затем, как сделал Дж. Дж. Томсон, путем исследования с помощью микроскопа отдельных капелек и измерения их скорости в газе, увеличивающейся также под влиянием электрического поля по сравнению со скоростью их падения под действием одной только силы тяжести.

Этот метод был затем усовершенствован и доведен до высокой степени точности Милликеном. Заменяя конденсацию паров воды распылением масла в газе, Милликен показал, что заряды всех капель и, следовательно, всех ионов, независимо от знака, по абсолютному значению всегда равны определенному элементарному количеству электричества или целому кратному этого количества. Наоборот, заряды, которые до того получались электростатическим путем, состояли из огромного количества этих зерен, что создавало иллюзию непрерывности зарядов. Отсюда оставался один шаг до завоевания области атомных величин.

Как заметил еще Гельмгольц, законы электролиза Фарадея являются связующим звеном между учением об атомной структуре вещества и теорией зернистого строения электричества. Поэтому непосредственное экспериментальное доказательство последней с неопровержимостью доказало правильность первой. После того, как Таунсенд установил с большой точностью, что заряд иона в газе равен заряду одновалентного иона в электролите, массу отдельного электролитического иона стало возможным определять — с точностью, равной точности определения заряда — из отношения между общим зарядом, перенесенным током, отлагающим при электролизе известное количество подобных ионов, и массой всего осадка. Так как химия дает точные сведения об отношении между массами отдельных атомов и молекул, то мы можем определить и массу каждого атома или каждой молекулы в отдельности, а также их размеры. Оказалось, что эти размеры не превосходят одной стомиллионной сантиметра.

Точно так же оказалось возможным выяснить и природу отрицательных частиц, из которых состоят катодные лучи. В 1897 г. Дж. Дж. Томсон вычислил отношение между зарядом такой частицы и ее массой, исходя из измерения ее отклонения под влиянием известных электрических и магнитных полей. С другой стороны, изучение катодных лучей в газах по методу конденсации показало, что заряд каждой отдельной частицы всегда равен элементарному заряду; отсюда может быть определена и масса отдельной частицы — она в 1800 раз меньше массы самого легкого атома — атома водорода, и всегда одинакова,

независимо от природы металла, из которого получаются катодные лучи благодаря электрическому разряду. Таким образом, было доказано существование нового вида материи, входящей в состав всех других известных нам видов материи и несравненно более *тонкой* — отрицательного электричества, состоящего из отрицательных электронов, масса и заряд которых известны нам в настоящее время с точностью до тысячных долей. Кроме этого, были известны еще два случая испускания веществом отрицательных зарядов, а именно: термоионные явления, открытые Эдисоном в 1883 г. на нитях накала и исследованные более подробно Пирсом, Флемингом и Ричардсоном, и фотоэлектричество, открытое Герцем в 1887 г. Последний показал на отдельном случае (который впоследствии был распространен и на вещество в целом), что все тела под действием световых лучей достаточной частоты испускают отрицательные заряды. Во всех этих случаях испускаемые заряды состоят из отрицательных электронов, тождественных с отрицательными электронами катодных лучей. Это опять-таки электрический флюид в чистом виде.

Изложенные выше открытия послужили толчком к дальнейшему развитию ионной теории электролиза, возрожденной Аррениусом в 1889 г., и связанной с ней теории гальванических элементов, развитой Нернстом, на которую, вследствие общего увлечения энергетикой, еще около 1900 г. смотрели с недоверием. Окончательное торжество теории электрических ионов и успехи, достигнутые в результате работ Дебая, явились мощным толчком к дальнейшему развитию теоретической и прикладной электрохимии. В то время как общее исследование показало, что катодные лучи являются первичными составными частицами материи, входящими в состав всех атомов, более детальное изучение рентгеновских лучей (испускаемых при падении катодных лучей на тела, стоящие на их пути, со скоростью, которая в некоторых трубках Крукса доходит до половины скорости света) подтверждало гипотезу, согласно которой новые лучи представляют собой электромагнитное излучение, по своей природе аналогичное свету, но гораздо более высокой частоты, с длиной волны, значительно меньшей молекулярных или атомных размеров.

Столь малая длина волны подсказала Лауэ мысль использовать природные кристаллические структуры в качестве дисперсионных решеток для спектроскопического исследования новых лучей. Эта мысль оказалась на редкость плодотворной. Во-первых, была подтверждена гипотеза о природе этого излучения и с точностью измерены длины волн; во-вторых, неожиданно выяснилось, что рентгеновские лучи благодаря ничтожно малым размерам длины их волны могут быть использованы для изуче-

ния структуры кристаллов и даже отдельных молекул, а это не только подтвердило теоретические построения химиков и кристаллографов, но и дало в их руки новое мощное орудие — внутримолекулярный микроскоп, применение которого постепенно распространяется на все области науки и техники.

* * *

Следуя все тем же экспериментальным путем, мы подходим теперь к наиболее значительному и интересному следствию, вытекающему из открытия Рентгена, — к открытию, далеко выходящему за пределы всей прежней философии и осуществляющему древнюю алхимическую мечту; речь идет об открытии радиоактивных свойств материи. Повторилась история открытия Рентгена, когда опыт, предоставленный самому себе, использовал счастливый случай или даже просто ошибку. Поразительная история открытия Беккереля известна всем. Тот факт, что падение катодных частиц на стеклянные стенки трубки Крукса сопровождается одновременным испусканием рентгеновских лучей и зеленой флюоресценции, навел Анри Пуанкаре на мысль о связи между этими двумя явлениями. Беккерель с детства восхищался красивыми кристаллами азотнокислого урана, фосфоресценция которых под действием света была исследована его отцом Эдмондом Беккерелем. Последний решил проверить правильность идеи Пуанкаре и убедиться в том, будут ли эти кристаллы, подвергнутые воздействию света, испускать, кроме своей обычной фосфоресценции, также и новые лучи. По счастливой случайности, неэкспонированный на свет кристалл, забытый в ящике стола по соседству с фотографической пластинкой, дал возможность убедиться в том, что между этими двумя эффектами в действительности нет никакой связи и что новая эмиссия является основным, до того неподозреваемым, постоянным свойством металлического урана. Последовали блестящие работы Пьера и Марии Кюри, которые, наблюдая, что некоторые минералы обладают теми же свойствами, но в значительно большей степени, чем этого можно было ожидать, и учитывая содержание в них урана, пришли к выводу о существовании каких-то неизвестных веществ, значительно более активных, чем уран.

Начинается работа по выделению новых элементов, с применением новой химии, в которой весы заменены электрометром. Сенсационные открытия следуют одно за другим: сначала полоний, радий, затем в течение нескольких лет сорок новых элементов, между тем как старая химия за все время своего существования открыла всего лишь 50 элементов. Резерфорд и Содди показали, что эти элементы порождают друг друга путем

самопроизвольных превращений и могут быть разделены на три группы: группы радия и актиния, происходящие из урана, и группу тория. Все три семейства заканчиваются свинцом, представляющим собой устойчивый продукт их постепенного радиоактивного распада.

Каждая из групп заключает элементы, средняя продолжительность жизни которых колеблется в чрезвычайно широких пределах: от нескольких миллиардов лет для наиболее устойчивых до миллионной доли секунды для наименее устойчивых. Эти изменения непрерывно происходят в толще горных пород независимо от внешних воздействий, оставляя при этом следы, по которым можно с точностью восстановить отдаленную историю геологических формаций.

Все радиоактивные превращения сопровождаются испусканием различных видов лучей: так называемые γ-лучи представляют собой световые лучи, по частоте и проникающей способности превосходящие лучи Рентгена; другие, так называемые β-лучи, состоят из отрицательных электронов, более быстрых, чем катодные лучи, скорость их приближается к скорости света, но никогда не достигает и не превосходит ее; наконец, α-лучи, которые, как показал Резерфорд, являются атомами гелия, обладающими положительным зарядом и выбрасываемыми со скоростью 20 000 *км/сек* в результате превращения некоторых неустойчивых и, следовательно, радиоактивных атомов в другие, более легкие, с потерей одного атома гелия.

* * *

Следующим этапом явился ряд знаменитых исследований, с помощью которых Резерфорд, используя для бомбардировки атомов α-частицы, выделяющиеся при естественном радиоактивном распаде, доказал ядерное строение всех атомов. Почти вся масса атома оказалась сосредоточенной в одной центральной области или ядре, с радиусом в 2000 раз меньшим радиуса атома, в то время как все остальное пространство занимают отрицательные электроны, число которых определяется химической природой атома и которые удерживаются вокруг ядра силами притяжения между их отрицательным зарядом и положительным зарядом атома. Простейшим из этих ядер является ядро водорода, известное под названием протона.

Резерфорд показал далее, что некоторые непосредственные соударения между α-частицами и атомными ядрами сопровождаются выбиванием из последних протонов. Выяснилось, что протон наряду с отрицательным электроном входит в состав всех атомов, т. е. всех ядер; этим самым неожиданно подтвер-

дилась правильность учения о единстве материи, согласно которому все атомы тяжелее водорода являются результатом конденсации некоторого целого числа атомов водорода. Так, атом гелия состоит из 4 атомов водорода, атом кислорода — из 16 атомов водорода и т. д.

Это дуалистическое представление о веществе, как состоящем из двух элементов — отрицательно заряженного электрона и протона, — господствовало в течение нескольких лет. Но вот уже два года, как в результате открытия нейтрона, в котором наш Институт радия в лице Ирен Кюри и Фредерика Жолио сыграл весьма выдающуюся роль, к ним присоединилась третья частица — с массой, близкой к массе протона, но с зарядом, равным нулю.

Еще более поразительные результаты были достигнуты в последнее время при использовании огромных напряжений порядка миллиона вольт, предоставляемых в наше распоряжение современной техникой. Вместо α-частиц в качестве снарядов брались другие ядра, например протоны, которым сообщалась максимально возможная скорость.

Эти столкновения между различными атомами открывают перед нами целый мир ядерной химии, фундаментально отличающейся от старой химии, в котором радиоактивные превращения элементов являются правилом: водород вступает в реакцию с фтором, образуя водород и гелий, с азотом — образуя бор и гелий, с возможной обратной реакцией, и с бором или литием — давая гелий. Исследование этой области едва только начинается; оно таит в себе множество сюрпризов и колоссальные возможности в виде использования огромных ресурсов внутриядерной энергии, высвобождаемой в результате ядерных реакций. Еще не осуществленное в настоящее время, превращение водорода в гелий может высвободить количество энергии, в несколько миллионов раз превосходящее энергию самых бурных химических реакций.

Прометей, который научил бы людей, как зажечь этот молниеносный костер ядерных реакций, еще не появился, и это, возможно, к лучшему.

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА И ДЕТЕРМИНИЗМ *

Последние 12 лет мы были свидетелями неуклонного развития атомной физики как в области экспериментального исследования атома, так и в области теории. В последней этот период ознаменовался развитием теории квант и волновой теории.

Развитие теории квант и, в частности, пресловутого принципа неопределенности послужило поводом к возобновлению дискуссий, которые в начале XX столетия сопутствовали первым успехам современной атомной теории. Снова встал вопрос о кризисе в физике. Идеалистические философы и примыкающие к ним физики, как Эддингтон, Джинс, Иордан, Дирак и др., снова утверждают, что современные успехи физики являются доказательством того, что реальный мир, независимый от нашего мышления, не существует, что в стремлении к познанию реальности мы наталкиваемся на непреодолимые препятствия, что каузальность и детерминизм существуют лишь в нашем сознании и что они сохраняют свою справедливость только в пределах известных границ, вне которых существует лишь индетерминизм самих фактов. Эти проблемы, и в особенности последняя, развивались в многочисленных комментариях, посвященных выдвинутому Гейзенбергом соотношению неточности, в котором комментаторы усмотрели признание наличия предела физического научного познания вообще и детерминизма в частности. Эти положения, как исходящие от физиков, так и выдвинутые философами, были сформулированы с такой поспешностью, что сделанные на основании их предсказания вскоре оказались опровергнутыми самым категорическим образом.

Так, например, в годы, непосредственно следующие за провозглашением принципа неопределенности, нашлись физики, не остановившиеся перед утверждением, будто наше познание атома не сможет превзойти уровня, достигнутого около 1931 г.

К тому времени мы уже были знакомы с атомом, знали о существовании ядра, но его структура была еще не известна.

---

* Статья, напечатанная в основанном Ланжевеном журнале «La Pensée», № 1, 1939, p. 1. — *Прим. ред.*

Однако ограниченность познания не помешала тому, что с тех пор законы атомной физики были разработаны с такой точностью, что в настоящее время эта новая глава физики по точности не уступает небесной механике Лапласа. Одновременно достигнуты большие успехи в деле изучения якобы непознаваемого атомного ядра. Таким образом, возникла новая область физики: физика ядра. Это показывает, что на пути нашего познания вещества нет никаких непреодолимых границ.

Подобным же образом, нет никаких оснований утверждать, что атомная область является отрезком реальности, в котором законы объективной причинности теряют свою приложимость и где течение событий не подчиняется никакой детерминированности. Все подобные выводы основываются на неправильном истолковании экспериментальных фактов, что с очевидностью выявляется при рассмотрении истории развития современной атомной физики.

В течение 30 лет мы перешагнули из макроскопического мира, где были созданы все основные представления, которыми оперировала до сих пор наша наука, в другую область реального, ставшую доступной познанию и изучению в результате непрерывного совершенствования экспериментальной техники. Первой открывшейся нам областью была область, окружающая ядро атома, где мы встретились с электронами, дающими начало явлениям испускания и поглощения света и позволяющими объяснить законы химических реакций обменом электронов между атомами. Затем мы перешли к исследованию области самого ядра. Естественно, что, переходя из одной области в другую, мы пытались применить для познания новых явлений те представления, которые были с успехом использованы в предыдущей.

Открыв около 25 лет назад ядерное строение атома, мы пытались представить его в виде планетарной модели — т. е. мы рассматривали атом как систему, состоящую из центрального положительно заряженного «солнца» (ядра атома), окруженного известным числом «спутников» в виде отрицательно заряженных электронов, обращающихся вокруг него под действием силы притяжения положительного ядра и сил отталкивания других электронов; при этом последнее действие аналогично пертурбациям движения одной планеты под влиянием движения других планет.

Таким образом, атом мыслился в виде миниатюрной солнечной системы, к которой, казалось, была приложена лапласовская концепция детерминизма: если в какой-либо момент заданы положение и скорость каждой частицы, входящей в состав атома, то этим полностью определяется все его последующее поведение.

Заслуга теоретического развития последствий, вытекающих из принятия такой концепции атома, принадлежит Бору. Однако на этом пути сразу же пришлось натолкнуться на значительные трудности. Согласно представлениям механики Лапласа, для электрона должны были быть возможны все орбиты. Другими словами, атом, с этой точки зрения, может иметь любые размеры, они неопределенны. Между тем, из опыта мы хорошо знаем, что все атомы одного и того же химического элемента имеют одинаковые размеры. Впрочем, даже если представить себе, что в некоторый данный момент все атомы имеют одинаковые размеры, мы все равно наталкиваемся на трудности, особенно наглядно выявляющиеся на примере простейшего случая — атома водорода, который состоит из ядра, несущего один положительный заряд, или протона и одного электрона, обращающегося вокруг него. В этом случае возмущения со стороны других электронов отсутствуют и действует только притяжение центрального ядра. Оказалось, что в этой области приложение электромагнитной теории Максвелла — Лоренца, которая в других областях дает столь удивительное по простоте и единству объяснение явлений света, электричества и магнетизма, наталкивается на фундаментальные затруднения. Во-первых, согласно теории Максвелла — Лоренца, заряженная частица, обладающая ускорением, должна испускать свет и, следовательно, терять известную долю своей энергии. Таким образом, электрон, обращающийся вокруг своего ядра, обладает постоянным ускорением и потому должен непрерывно терять энергию. Вследствие этого орбита электрона должна непрерывно приближаться к ядру вплоть до того момента, когда электрон, исчерпав всю свою энергию, упадет на ядро, прекращая тем самым существование атома. Как показывает вычисление, все это должно занять ничтожную долю секунды. Между тем мы знаем, что атом водорода стабилен и существование его определяется, по всей вероятности, миллиардами лет.

С другой стороны, та же теория утверждает, что излучение, испускаемое электроном при его обращении вокруг ядра, должно по частоте равняться числу оборотов в секунду. А это значит, что по мере того, как электрон приближается к ядру, теряя при этом энергию, частота излучения должна непрерывно изменяться. Следовательно, атом не может испускать свет определенного цвета; свет, излучаемый атомом, будет непрерывно менять свой цвет, т. е. будет обладать непрерывным спектром.

Таким образом, приложение электромагнитной теории к планетарному атому приводит к двум следствиям, находящимся в грубом противоречии с опытом. Во-первых, к предположению о нестабильности атома, быстро теряющего свою энергию

в результате излучения, и, во-вторых, к предположению о непрерывности атомных спектров, между тем как хорошо известно, что все атомы, в том числе атомы водорода, обладают прерывным линейчатым спектром. Для выхода из затруднения Бор предложил воспользоваться представлением о квантах излучения, выдвинутым Планком в 1900 г., согласно которому излучение света атомом или энергии веществом совершается лишь конечными порциями — квантами. Если ν — частота этого света, то испускаемая световая энергия будет равна целому кратному от $h\nu$, где h — очень малая мировая константа, знаменитая *постоянная Планка*. Бор пришел к выводу, что необходимо ввести представление о прерывности там, где электромагнитная теория признавала лишь непрерывность. Не порывая окончательно с классической механикой, он нашел необходимым произвести отбор среди непрерывного ряда возможных движений, допустимых для электрона с точки зрения последней, и сохранить лишь прерывный ряд, каждый член которого соответствует стабильному состоянию атома, т. е. произвести то, что мы теперь называем квантованием движения. Каждое из этих стабильных состояний должно было соответствовать одному из термов, введенных спектроскопистами для изображения, с помощью разности между ними, частоты различных линий в атомных спектрах (комбинационный принцип). Далее Бор предположил, что атом может испускать или поглощать излучение только при переходе из одного стабильного состояния в другое, причем количество излучаемой или поглощаемой энергии должно быть равно разности между энергиями атома в исходном и конечном состояниях — в соответствии с экспериментальным фактом, согласно которому частота линии, соответствующей излучению, равна разности между термами, соответствующими этим двум состояниям атома. Отбор среди непрерывного ряда возможных, с точки зрения классической механики, решений, соответствующих внутриатомным движениям, рассматриваемым как стабильные, был произведен Бором при помощи чрезвычайно простого правила квантования, которое в дальнейшем пытались распространить также и на случай атома с любым числом электронов.

Таким образом, представления Бора вступали в противоречие с электромагнитной теорией, так как он допускал, что эти «привилегированные» движения могут не сопровождаться излучением и что в известных, весьма загадочных, условиях электроны могут переходить от одного квантового движения к другому либо с испусканием света, если переход происходит с более высокого энергетического уровня на более низкий, либо, наоборот, с поглощением кванта падающего света, если переход совершается с более низкого на более высокий энергетический уровень.

Однако блестящий успех теории Бора для случая водородного атома отвлек внимание физиков от этого противоречия. Его теория давала возможность перейти от старых представлений механики и электромагнетизма, оказавшихся явно недостаточными для объяснения внутриатомных явлений, к новым представлениям, более адэкватным реальности и получившим свое дальнейшее развитие в квантовой теории и волновой механике. Как известно, квантование водородного атома Бором на основе ньютоновской классической механики и, в еще большей степени, квантование этого атома Зоммерфельдом с использованием новой механики, введенной теорией относительности, дало возможность полного * истолкования атомного спектра водорода и обусловило дальнейшее блестящее развитие спектроскопии.

Итак, мы видим, что, согласно прежним представлениям, размеры атома были совершенно неопределенны, что противоречило опыту. Введение представления о кванте действия h дало возможность фиксировать размеры атома, которые детерминируются именно величиной h. Если некоторые полагают, что именно величина h детерминирует пресловутый индетерминизм атома, то, как мы увидим ниже, этот простой факт заставляет нас усомниться в правильности такого вывода. Однако, как мы уже упоминали, первоначальная теория Бора была далеко еще не совершенна. Попытки приложения ее к атомам более сложным, чем атом водорода, встретили затруднения, которые вначале казались совершенно непреодолимыми. Тем не менее, прошло всего лишь несколько лет — и мы теперь видим постепенное развитие, с одной стороны, квантовой механики Гейзенберга, Борна и Дирака, а с другой, в тесном взаимодействии с ней, — волновой механики де Бройля, Шредингера и др.

Напоминаем, что под именем *квантовой механики* понимается совокупность работ, посвященных систематическому учету кванта действия при изучении атомных систем. Подобно классической механике, квантовая механика занимается изучением скоростей и положений материальных точек. Однако, в то время как в классической механике положения и скорости выражаются при помощи алгебраических чисел, в квантовой механике для их выражения используются числа высшего порядка, так называемые матрицы. Последние представляют собой особого рода бесконечные таблицы. Физический смысл этого различия заключается в том, что классическая механика рассматривает положения и скорости, могущие принимать различные значения независимо друг от друга, между тем как в квантовой механике скорости и

* Следовало бы сказать: более полного. Это истолкование вовсе не являлось исчерпывающим. Даже современная квантовая механика встречает некоторые трудности в объяснении спектра атома водорода — *Прим. ред.*

положения уже не могут принимать любые значения, но изменяются дискретно в соответствии с постоянной Планка.

Не следует думать, что между классической и квантовой механикой существует абсолютное противоречие. Классическая механика представляет собой частный случай квантовой механики, в котором постоянной Планка можно пренебречь. Классическая механика является отображением известного уровня нашего познания реальности, познания, которое в квантовой механике оказывается значительно более углубленным. Утверждение, будто мы открыли, что классическая механика оказалась ложной, не соответствует действительности; мы только обнаружили границы ее приложимости и нашли способ переступить их.

Что касается волновой механики, то, как известно, основная мысль Луи де Бройля заключалась в том, что он, в приложении к веществу, проделал путь, обратный тому, который был проделан при изучении света. Действительно, наряду со световыми волнами, прекрасно выражающими одну сторону оптических явлений — ее классический аспект (интерференцию, дифракцию и пр.), — оказалось необходимым для объяснения таких явлений, как фотоэффект, эффект Комптона и др., принять также и гипотезу о корпускулярном строении света. Основной задачей теории излучения является именно нахождение необходимого синтеза этих двух представлений волнового и корпускулярного, волн и фотонов (или световых частиц), соответствующих различным аспектам реальности. В этой связи хотелось бы сделать несколько замечаний особенно потому, что именно здесь мы находимся у самого источника пресловутого «принципа неопределенности».

История теорий света показывает, что для объяснения света физики попеременно пользовались то волновыми, то корпускулярными представлениями. Корпускулярная теория излагалась еще Лукрецием; в XVII и XVIII вв. Гюйгенс и Ньютон поддерживают — первый волновую, а второй корпускулярную теорию; последняя безраздельно господствует в физике вплоть до появления механической волновой теории эфира Френеля, в свою очередь уступающей место электромагнитной волновой теории Максвелла.

Корпускулярная теория в ее первоначальном виде относилась к наиболее простому свойству света — его распространению по прямой линии. Однако через некоторое время стало очевидно, что эта теория не в состоянии объяснить более сложные явления, например явления дифракции. Поэтому она была заменена теорией Френеля, которая наряду с объяснением прямолинейного распространения объясняет явления дифракции и интерференции. Последняя также не была свободна от затруд-

нений, и ее заменила электромагнитная теория Максвелла, которая объясняла те же явления, что и теория Френеля, и, кроме того, обнаруживала тесную связь между световыми явлениями и явлениями электричества и магнетизма.

Эта теория добилась блестящих успехов — достаточно вспомнить опыты Герца с электромагнитными волнами. Но она натолкнулась на трудности при переходе к исследованию излучений очень малой интенсивности. К этому времени относится появление квантовой теории света, которая ставила себе целью объяснить как то, что так прекрасно объясняла теория Максвелла, так и новые квантовые явления. Совершенно очевидно поэтому, что когда мы говорим о существовании световых частиц, фотонов, то здесь не может быть и речи о возвращении к ньютоновским представлениям в их чистом виде.

Электромагнитная теория является необходимым, но пройденным этапом, и фотон носит на себе отпечаток ее влияния. Впрочем, мы уже знаем, что электромагнитная теория наталкивается на затруднения в случае света очень высокой частоты, однако в настоящее время трудно предугадать, каков будет путь дальнейшего развития наших представлений.

Как бы то ни было, наши сведения относительно свойств света постепенно расширяются. Достаточно напомнить, что несколько лет назад нам удалось с очевидностью доказать превращение света в вещество и обратно. Поэтому попытка вывести из этой смены теоретических воззрений утверждение о невозможности познания кажется мне противоречащей самому духу науки и всему ходу ее развития.

Кроме того, следует заметить, что детерминизм корпускулярной теории отличается от детерминизма волновой теории. Так, детерминизм волновой оптики, определяющей совокупную картину интерференции или дифракции, значительно отличается от детерминизма геометрической оптики, фиксирующей положение каждой световой частицы (светового луча) в отдельности. Этот факт достаточен, чтобы показать, что в области волновой оптики детерминизм сильно отличается от механического детерминизма Лапласа.

Ниже мы покажем, что это в равной степени справедливо в приложении к веществу.

Поиски теории атома, могущей отразить всю совокупность накопленного экспериментального материала, привели, как мы уже видели, к развитию квантовой механики. Те же соображения привели Луи де Бройля к разработке волновой механики путем связывания волн с различными частицами (электронами, протонами и пр.), подобно тому, как в оптике частицы связывались с волнами. Затем Луи де Бройль использовал упомянутое выше соотношение Планка, выражающее зависимость между

энергией и частотой волны, чтобы, следуя по пути, обратному тому, который был принят при изучении света, вывести частоту волны из энергии частицы.

Эта идея, развитие которой стало возможным благодаря специальной теории относительности, нашла немедленное подтверждение в опытах Девисона, Джермера и Дж. П. Томсона, выявивших волновой аспект вещества, так сильно отличающийся, по крайней мере внешне, от его «классического» корпускулярного аспекта. Таким образом, мы убеждаемся в том, что свет, как и вещество, двойственен по своей природе: волновой в одних случаях, корпускулярной — в других. Попыткой обобщения этих двух аспектов явилась разработка статистических представлений. С точки зрения этих концепций, волна света или вещества определяет вероятность наличия частиц (фотонов — в случае света; электронов, нейтронов, протонов и пр. — в случае вещества), распределение этих частиц на фотографической пластинке в полосах интерференции и дифракции, а также распределение их в пространстве и во времени в их возможных индивидуальных состояниях. Но такая статистическая концепция полностью противоречит прежним механическим корпускулярным представлениям. Это противоречие было сформулировано Гейзенбергом 12 лет назад в форме так называемого принципа неопределенности — название, которое, в силу его двусмысленности, довольно неудачно.

Я попытаюсь дать здесь понятие об этом «принципе неопределенности». Он представляет собой следствие сосуществования двух аспектов, корпускулярного и волнового. Мы знаем, с точки зрения корпускулярной теории, что если мы характеризуем положение частицы координатой q, то, по законам динамики, эта координата оказывается связанной с сопряженной переменной, а именно — количеством движения, обозначаемым через p. Классическая теория принимает, что q может быть определено в любой момент с любой желаемой точностью и что ошибка Δq в ее определении может быть сделана бесконечно малой. Та же теория предполагает возможность одновременно определить скорость, а следовательно, и количество движения p также с любой степенью точности.

Ошибки Δp и Δq при определении количества движения и координаты рассматриваются как независимые друг от друга, и их произведение может быть сделано сколько угодно малым.

Напротив, сущность «соотношения неточности» заключается в утверждении, что невозможно в один и тот же момент определить с бесконечной точностью p и q и что произведение ошибок $\Delta p \cdot \Delta q$ ни в коем случае не может быть меньше постоянной Планка h. Приведем следующий простой пример.

Представим себе пучок электронов, скорость которого вполне определенна по величине и направлению, являющемуся в данном

случае горизонтальным. На языке волновой механики это означает, что плоская электронная волна определенной частоты и длины распространяется в указанном направлении. Электрон, входящий в состав пучка, может находиться в любой точке пространства, занимаемого волной. Рассмотрим его вертикальную координату q. Так как положение нашего электрона неопределенно, то Δq очень велико. Для получения большей точности определения положения в вертикальном направлении нужно взять две пластинки и сдвигать их таким образом, чтобы получалась горизонтальная щель, перпендикулярная направлению распространения. Чем уже будет эта щель, тем более точным будет определение положения электрона в вертикальном направлении, и ошибка Δq будет равна ширине щели.

Однако прохождение электрона и связанной с ним волны через узкую щель должно сопровождаться дифракцией (аналогично тому, как это имеет место для световой волны), при этом за пределами щели направление скоростей электронов будет различно. Порядок величины отклонения, соответствующего этой дифракции, по законам дифракции, дается отношением длины λ электронной волны к ширине щели Δq.

Дифракция возрастает с увеличением длины волны и уменьшением ширины щели. Это означает, что количество движения, горизонтальное до прохождения через щель, после прохождения ее вообще меняет направление. В вертикальном направлении неточность в определении количества движения будет равна составляющей количества движения, в этом направлении отклоненного на угол Θ. Так как, согласно основному соотношению де Бройля, количество движения равно $\frac{h}{\lambda}$, то неопределенность Δp будет равна:

$$\Delta p = \frac{h}{\lambda} \cdot \Theta = \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{\Delta q}, \text{ откуда } \Delta p \cdot \Delta q = h.$$

Это и есть «соотношение неточности» Гейзенберга, выведенное им как следствие экспериментального факта дифракции электронных волн. С этим соотношением мы встречаемся при каждой нашей попытке максимально уточнить положение электрона с помощью прибора, аналогичного микроскопу. Мы направляем пучок света на электрон, последний возвращает его в направлении наблюдателя, и точка на окуляре микроскопа, где образуется светящееся пятно, указывает положение электрона в данный момент. Чем меньше пятно, тем выше точность определения. Между тем известно, что размеры светящегося пятна, опять-таки в силу дифракции, определяются длиной волны используемого света.

Если мы желаем определить положение электрона с большой точностью, необходимо уменьшить до минимума размеры пятна

и, следовательно, использовать свет самой короткой длины волны. Между тем, по квантовой теории, в этом случае энергия кванта света должна быть очень высока. При столкновении с электроном последний испытает очень сильную отдачу, которая будет тем больше, чем короче длина волны. Поэтому, если бы мы решили определить положение электрона с большой точностью, то нам не удалось бы с точностью определить его скорость вследствие отдачи. Наоборот, если бы мы решили точно узнать скорость электрона, для этого достаточно было бы осветить его светом с очень большой длиной волны и измерить изменение последней под действием электрона (эффект Допплера). Однако в таком случае размеры дифракционного пятна колоссально возрастут, и определение положения электрона будет весьма неточное. В данном случае, как и в предыдущих, $\Delta p \quad \Delta q = h$.

Этот вывод и явился отправной точкой для провозглашения банкротства детерминизма.

Утверждалась невозможность определения движения частицы, поскольку невозможно одновременно экспериментально определить положение и скорость любой частицы. Это сводилось к утверждению возможности существования одного только лапласовского детерминизма. С того момента, как последний оказался неприложимым в данной области, объявляется невозможным и всякий детерминизм. Мы видим, однако, что уже изучение только волнового аспекта света выявляет нам наличие детерминизма, в значительной степени отличающегося от лапласовского. Здесь достаточно будет вспомнить о многочисленных попытках конца прошлого века, предпринятых с целью механического объяснения теории Максвелла.

Неприложимость лапласовского детерминизма была воспринята как достаточное оправдание для рассуждений о «свободе воли электронов», о «свободном выборе», который делает природа в том или ином случае. Электрон уподоблялся человеческому индивидууму.

Эти толкования зашли настолько далеко, что Эддингтон в своей книге «Природа физического мира» говорит: «Делая вывод из этих аргументов, доставляемых современной наукой, можно, пожалуй, сказать, что религия стала приемлемой для научных умов, начиная с 1927 г... Если наше предсказание о том, что 1927 г. увидит окончательное исключение строгой причинности Гейзенбергом, Бором, Борном и др. справедливо, то этот год, наверное, будет знаменовать одну из величайших эпох в развитии научной мысли». Новая книга Иордана «Физика XX века» (1938 г.) изобилует категорическими формулировками вроде следующих: «ликвидация материализма», «совершенно новая позитивная возможность гарантировать верующему его жизненное

пространство, не вступая в противоречие с научной мыслью», «отказ от объективности» и пр. Были сделаны попытки использовать принцип неопределенности также и для разрешения некоторых проблем совершенно иного порядка.

Нас окружает, с одной стороны, так называемая мертвая материя, управляемая физико-химическими законами, и с другой — живая материя, подчиняющаяся законам биологии. Предлагалось следующее объяснение фундаментального различия между этими двумя аспектами реальности: физическая химия имеет дело лишь с системами, в которых статистика (вследствие большого количества частиц) немедленно вступает в силу, ограничивая проявления свободы электронов, между тем как в структуру живых существ входит, в качестве составной части, как бы усилитель «свободного выбора» некоторых электронов. В нашей центральной нервной системе имеются привилегированные области, в которых известные отдельные электроны имеют возможность непрерывно осуществлять свободный выбор, а жизнь является не чем иным, как усилительной организацией этого выбора.

Постараемся несколько глубже вникнуть в смысл вышесказанного. Изучение атомной области открыло нам много нового — электроны, протоны, ядра. Мы пытались перенести в эти новые масштабы привычные нам представления «классической» механики и электромагнетизма. Мы пытались применить к ним представления простого механического движения — механический детерминизм Лапласа. Мы рассматривали электроны и другие частицы лишь как экстраполяцию в область бесконечно малого обычных, привычных нам, объектов. Здесь мы на опыте убедились в невозможности точного одновременного определения положения и скорости частицы с целью предсказания ее дальнейшего движения. И вот уже только из этого мы сразу же выводим заключение о якобы наличии индетерминизма природы. Не лучше ли принять, что наша корпускулярная концепция не адэкватна, что невозможно дать картину субатомного мира путем простого распространения до крайних пределов наших макроскопических механических представлений о движении. Если природа не дает точного ответа на наш вопрос относительно электрона, уподобляемого частице классической механики, то не будет ли слишком большой самонадеянностью сразу заключить, «что природа не знает детерминизма?».

Не будет ли более правильным сказать, что сама постановка вопроса является неправильной и что электрон вообще не может быть уподоблен частице в понимании классической механики? Поэтому вопрос заключается совсем не в том, чтобы обвинять природу, а в том, чтобы изменить самую постановку вопроса, что, несомненно, гораздо труднее, но зато значительно плодотворнее.

В действительности речь идет вовсе не о кризисе детерминизма вообще, но лишь о кризисе механицизма, который мы пытались приспособить для объяснения совершенно новой области. Нам приходится констатировать недостаточность для объяснения микромира тех концепций, которые оправдали себя в макроскопической области, для которой они были созданы и где применялись в продолжение многих поколений.

Мы видим, что окружающий нас мир несравненно богаче, чем воображал Паскаль, представлявший себе микромир в виде уменьшенной копии макромира. С этой точки зрения, мы во всех областях должны были бы столкнуться с одинаковыми аспектами реальности и всюду применять те же представления. Между тем действительность несравненно более разнообразна. Каждая новая область, в которую мы вступаем, открывает перед нами новые истины и требует от нас новых конструктивных усилий теоретической мысли. Я твердо убежден, что эти усилия должны быть направлены по пути, идя по которому, научная мысль продвинулась уже так далеко. Я уверен, что, отказываясь от детерминизма, мы лишим науку ее основного движущего начала — того, что до сих пор составляло ее силу и залог ее успеха: веры в конечную познаваемость вселенной. Ничто в переживаемых нами трудностях не оправдывает и не требует изменения наших установок, что, по моему глубокому убеждению, было бы равносильно отречению.

В частности, постоянная h Планка нередко интерпретируется как определяющая границы области, в которой царствует полный индетерминизм — «чистый случай». Однако граница индетерминированности удивительно точно определена при помощи этой постоянной величины, которая известна нам с точностью до тысячных долей. Постоянная h играет фундаментальную роль в глубочайших законах природы и в самых различных явлениях. Нашей целью должно быть возможно более детальное изучение ее глубокого смысла, а не отказ от научного подхода именно в тот момент, когда он более, чем когда-либо, необходим и плодотворен. Недостаточно провозгласить, что постоянная h определяет индетерминированность; развитие современной атомной теории является наглядным подтверждением того, насколько важно для физика сохранить верность основному принципу, направляющему его работу, а именно: стремлению двигаться вперед в поисках детерминизма.

Переживаемые нами трудности не должны нас смущать, если мы вспомним грандиозность уже достигнутого и того, что можно ожидать в будущем. Мы принуждены работать, руководствуясь привычными представлениями и умственными орудиями, созданными нашей наукой сравнительно недавно. Именно таким путем нам удалось разрешить стоящую перед нами задачу объяснения

совершенно новой области — сначала атомной, а затем только что открытой области физико-химии ядра. Возможно, что знакомство с новыми частицами: нейтронами, мезотронами и нейтрино, готовит нам сюрпризы, аналогичные тем, с которыми мы столкнулись при переходе из макромира в микромир. А это означает, что нам придется выковать себе новое оружие, подобно тому, как наши предки выработали те представления, которые стали для нас привычными и конкретными в результате длительного их использования. Собственный опыт учит нас, что очень абстрактные и трудно усвояемые представления приобретают конкретность только в результате долголетнего пользования ими. Достаточно вспомнить, например, что такие представления, как электрический потенциал или энтропия, теперь прочно вошедшие в обиход, в дни моей юности казались чрезвычайно абстрактными. Аналогичный процесс, мне кажется, происходит также и в области атомной и ядерной физики. Я убежден, что потенциальные представления, заложенные в уравнениях новой динамики, в результате постоянного соприкосновения с ними смогут быть конкретизированы.

В настоящее время мы переживаем чрезвычайно интересную эпоху развития человеческого разума. Разум не дан априори и не имеет тех жестких рамок, которые предполагались раньше. Отражая все более точно окружающий нас внешний мир, разум постепенно эволюционирует, все более и более овладевает той реальностью, которую мы знаем и наше господство над которой непрерывно возрастает.

Сорок лет назад только и говорили что о «кризисе атомизма», между тем как развитие физического исследования неопровержимо доказало реальность атомов. Сегодня говорят о «кризисе детерминизма», тогда как в действительности объективная детерминированность фактов в настоящее время известна значительно лучше, чем еще сравнительно недавно. Несомненно, по мере расширения нашего познания реальности мы вынуждены будем видоизменять и представление о детерминизме. Те, кто старается изобразить эволюцию нашего познания детерминизма как банкротство причинности, напрасно ссылаются на новейшие достижения современной науки. Их идеи взяты совсем не оттуда; они извлечены из старой философии, враждебной научному познанию; ее-то они и хотят снова протащить в науку. И когда тот или иной философ-идеалист ссылается на физика-идеалиста, он лишь берет у него обратно те представления, которые когда-то ссудил ему сам. Способность науки познать реальность такой, как она есть в действительности, — вот в чем заключается тот поразительный по своей наглядности урок, который вытекает из достижений современной физики и всего того, что обещают ведущиеся в настоящее время работы.

ЭРА АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ *

Значение атомной бомбы для будущего человечества колоссально. Это нечто гораздо большее, чем просто изобретение нового оружия. Это открытие знаменует собой начало новой эры, эры искусственных ядерных превращений. Открывающиеся перед нами перспективы оставляют далеко за собой все, о чем мечтали средневековые алхимики, причем теперь целью является не получение золота — что ни в какой степени не способствовало бы благу человечества, — а овладение неисчерпаемыми запасами энергии, заключенными в недрах атома и сконцентрированными в его ядре. О наличии этой энергии мы узнали сравнительно недавно, всего около пятидесяти лет назад, благодаря открытию радиоактивности Беккерелем и Марией Кюри. Открытие радиоактивности по своему значению в истории цивилизации, быть может, будет поставлено наряду с открытием огня, а возможности его применения на практике, в настоящее время ограничивающиеся лишь областью медицины, далеко оставляют за собой паровую машину, водяные турбины и двигатели внутреннего сгорания.

Теперь, когда в связи с концом войны народы мира снова становятся хозяевами своих судеб и когда от их воли зависит, куда будет направлена новая колоссальная сила — на благо или гибель человечества, перед каждым из нас встает необходимость ознакомиться с природой той технической революции, неограниченные последствия которой в настоящее время вырисовываются уже с достаточной ясностью.

I

На заре цивилизации единственным источником механической энергии для постепенно дифференцирующихся трудовых процессов являлась мышечная сила рабов и животных. Следующей ступенью явилось использование естественной силы воды и ветра — первоначально на парусных судах, а затем для приведения в движение мельниц. Однако незначительная мощность водяных и ветряных двигателей тормозила развитие промышленности,

* Из журнала «La Pensée», № 4, 1945. — *Прим. ред.*

которая при тех условиях так и не смогла продвинуться дальше стадии ремесла.

В конце XVII в. открытие возможности превращения тепла в работу с помощью паровой машины положило начало новой эпохе — эпохе крупной индустрии, скоростных сообщений по морю и суше и международной торговли. Открытие законов, управляющих таинственными явлениями магнетизма и электричества, и их использование для передачи на большие расстояния энергии, генерируемой паровой машиной, наряду с возможностью безграничного дробления этой энергии придали последней несравненную гибкость. Одновременно изобретение мощных гидравлических турбин и двигателей внутреннего сгорания значительно увеличило силы, находящиеся в нашем распоряжении, так же как и возможности их приложения.

Таким образом, к механической энергии ветра и падающей воды около двухсот лет назад прибавилась энергия, генерируемая тепловыми двигателями различных типов в результате преобразования некоторой доли тепла химического происхождения, выделяющегося при сгорании угля, дерева или нефти. Во всех случаях основным источником энергии является солнечное излучение.

Промежуток времени, протекающий между зарождением того или иного вида энергии и ее использованием, почти равный нулю в случае ветра, превращается в месяцы и годы для водопадов, питаемых таянием снегов или ледников, в десятки лет для древесного топлива и в целые геологические периоды для каменного угля и нефти.

Во всех этих случаях процент полезной энергии чрезвычайно низок, а вся используемая энергия представляет собой только ничтожную долю потока энергии, изливаемой на земной шар центральным светилом, сила притяжения которого удерживает нас в области его благотворного влияния. Проблема непосредственного использования солнечного излучения для получения необходимой человечеству механической энергии или даже только для замены топлива в тепловых двигателях остается неразрешенной и до настоящего времени.

Между тем получение даже этого ограниченного количества энергии, постройка громадных гидравлических сооружений, разведка и все возрастающие трудности эксплоатации угольных шахт и нефтяных месторождений, перевозка огромного количества драгоценного топлива, накопленного в течение сотен миллионов лет и запасы которого убывают со все возрастающей быстротой без надежды на восстановление, — все это сопряжено со значительными трудностями и требует затраты колоссального количества труда.

Открытие радиоактивности показало, что источником излуче-

ния, испускаемого Солнцем и другими светилами, являются превращения, происходящие внутри этих тел, и, в частности, для Солнца — превращение водорода в гелий.

Однако те механические, физические и химические процессы, с помощью которых мы используем ничтожную долю лучистой энергии Солнца, по своей природе несравненно более поверхностны, чем те превращения, результатом которых является генерирование солнечной энергии. Нагревание поверхности океанов и суши вызывает появление ветров и дождей, приводящих в движение водяные и ветряные двигатели. Поглощение света зелеными частями растений делает возможным синтез древесины из углекислоты воздуха и воды, содержащейся в почве. Благодаря наличию атмосферы, особенно богатой углекислотой, этот процесс явился причиной роскошного развития растительности каменноугольного периода. Сгорание дерева или угля, сопровождающееся выделением воды и углекислоты, освобождает энергию света, связанную в результате процесса фотосинтеза.

Происхождение нефти представляет собой результат аналогичного процесса. Нефть, по всей вероятности, является продуктом подземного разложения в течение тысячелетий огромных наслоений морских организмов, питающихся планктоном, развитие которого, подобно росту растений, обусловлено поглощением солнечной энергии.

Несколько цифровых данных поможет уяснить относительное значение этих механических и химических процессов и тех превращений, отдаленным отражением которых они являются. Механическая энергия, сообщаемая турбине в результате падения килограмма воды с высоты тысячи метров, в три тысячи раз меньше количества химической энергии, освобождаемой при сгорании килограмма каменного угля и нефти, а последняя, в свою очередь, в двадцать миллионов раз меньше энергии, генерируемой, в Солнце при превращении одного килограмма водорода в гелий.

Для того чтобы составить себе представление о масштабах процессов, происходящих в Солнце, достаточно вспомнить, что на Солнце ежесекундно происходит превращение пятисот миллиардов килограммов водорода.

Таким образом, теперь мы хорошо знаем, какое огромное значение может иметь для человечества возможность произвольного и достаточно эффективного осуществления, по мере необходимости, тех превращений, которые до настоящего времени использовались в столь неудовлетворительной степени путем тех же или аналогичных реакций.

Перед нами открываются широчайшие перспективы. Правда, этот путь небезопасен, однако связанные с ним опасности не больше тех, которые обычно возникают в связи с применением любого нового метода; и мы можем свести их до минимума.

II

В 1896 г., меньше чем через год после открытия Рентгеном лучей, носящих его имя, Анри Беккерель открыл, что металлический уран и все его соединения обладают удивительным свойством самопроизвольного и непрерывного излучения. Это излучение, считавшееся сначала всего лишь разновидностью рентгеновского излучения, а затем, при дальнейшем исследовании, оказавшееся значительно более сложным по своей природе, при прохождении через экраны, непрозрачные для световых лучей, вызывает почернение фотографической пластинки и, будучи пропущено через воздух и другие газы, превращает их в проводники электричества. Способность делать газы проводниками электричества, легче всего поддающаяся измерению, позволила Пьеру и Марии Кюри открыть наличие свойства, названного ими радиоактивностью, также и в другом всем известном металле — тории, а затем повело к открытию в урановых рудах двух новых элементов — радия и полония, радиоактивность которых в миллионы раз превосходит радиоактивность урана и тория.

Вскоре работами Пьера Кюри и английских физиков Резерфорда и Содди было установлено, что испускание новых лучей сопровождается подлинным превращением элементов и представляет собой лишь внешнее проявление последнего. Каждое радиоактивное вещество самопроизвольно превращается в другое, обычно тоже радиоактивное вещество, обладающее совершенно другими химическими свойствами. Несколько последовательных поколений таких радиоактивных веществ или элементов составляют как бы семейство, из которых в настоящее время известны три: семейства урана, тория и актиния (открытое Дебьерном). Семейство урана включает в пятом поколении радий, в тринадцатом — полоний и в четырнадцатом поколении заканчивается свинцом, который стабилен и не подвержен дальнейшему самопроизвольному распаду.

Продолжительность последовательных ступеней в этом каскаде преобразований характерна для данного радиоактивного вещества. Каждое вещество, порождая последующее, разрушается и само, причем продолжительность периода, необходимого для распада половины вещества, колеблется от 4 миллиардов лет для урана и 10 миллиардов лет для тория до одной миллионной доли секунды для некоторых особенно неустойчивых промежуточных форм. Для радия продолжительность этого периода равна 1600 годам, а для его непосредственного потомка — эманации радия или радона, который представляет собой газ, — всего 4 дня.

Исследуя радий или, точнее, одну из его солей — бромистый радий, Пьер Кюри в 1903 г. открыл еще одно явление, всегда

сопутствующее радиоактивным превращениям, а именно: выделение огромного количества тепла, в несколько миллионов раз превосходящее то, которое выделяется тем же количеством превращенного вещества при обычных химических реакциях. Таким образом, было впервые доказано, что реакции, в которых химические элементы сохраняют свою индивидуальность, чрезвычайно поверхностны по сравнению со значительно более глубокими изменениями, сопровождающими радиоактивные превращения.

Все значение этих новых открытий может быть полностью оценено только при подходе к ним с точки зрения атомной теории, блестящим подтверждением которой они явились. В свою очередь, эти открытия обеспечивают дальнейшее плодотворное развитие теории.

Согласно атомной теории в ее первоначальной форме, все простые тела, или элементы, выделенные химиками, состоят из атомов, совершенно одинаковых для каждого данного элемента. Атомы различных элементов различаются между собой по химическим свойствам и массе, начиная от наиболее легкого атома — водорода — и кончая самым тяжелым атомом урана. Ряд давно известных промежуточных элементов включает гелий, углерод, азот, кислород, хлор, серу и много других наряду с недавно открытыми элементами, к числу которых принадлежит большинство радиоактивных элементов или изотопов, о которых речь будет ниже.

С помощью различных методов, дающих совпадающие результаты, оказалось возможным сосчитать, взвесить и измерить эти атомы. Они настолько малы, что одно и то же количество их, содержащееся в 1 *г* водорода, 16 *г* кислорода или 238 *г* урана, так называемое число Авогадро, выражается двадцатичетырехзначным числом, из которого с точностью известны только три первых знака. Размеры атомов меняются при переходе от одного элемента к другому, но в менее значительной степени, чем масса. Если рассматривать атомы как небольшие шарики, то диаметры их меняются от одного до двух, начиная с самых маленьких атомов водорода и кончая атомами щелочных металлов калия и натрия, которые, повидимому, являются самыми крупными. Размеры атомов настолько малы, что, например, пять миллионов атомов водорода, расположенные в ряд, займут не более одного миллиметра.

Открытие радиоактивности сделало возможным изучение внутреннего строения этих крошечных частиц. Оказалось, что каждый из атомов состоит из центрального положительно заряженного ядра, диаметр которого в 10 тысяч раз меньше диаметра самого атома и в котором сконцентрировано больше $\frac{999}{1000}$ общей массы атома. Ядро окружено некоторым числом, меняющимся в

зависимости от природы атома, отрицательно заряженных электронов, или негатронов, существование которых было открыто одновременно с открытием радиоактивности. Число их колеблется от 1 для водорода до 92 для урана.

Эти электроны, абсолютно идентичные между собой независимо от природы элемента, несут отрицательный заряд. Их массы приблизительно в 2000 раз меньше массы наиболее легкого атома водорода. Отрицательно заряженные электроны наряду с положительными электронами, или позитронами (открытыми гораздо позднее, в 1932 г.), отличающимися от первых только по знаку заряда, представляют собой корпускулярные компоненты того электрического флюида, который был придуман физиками XVIII в. для объяснения явлений притяжения и отталкивания между наэлектризованными телами. В отличие от отрицательных электронов, существующих во всех атомах и представляющих собой первичную составную часть вещества, существование положительных электронов чрезвычайно кратковременно. Положительные электроны, получающиеся в результате некоторых искусственных превращений, быстро погибают вследствие взаимной аннигиляции с отрицательными электронами, сопровождающейся испусканием излучения, аналогичного свету или лучам Рентгена. Обычно ядра несут положительные заряды, которые в электрически нейтральных телах компенсируются зарядами отрицательных электронов, окружающих ядро. Наличие электрического заряда тела, в целом положительного или отрицательного, соответствует недостатку или избытку по сравнению с нормой отрицательных электронов в атомах, входящих в состав данного тела.

В 1888—1897 гг. изучение электрического разряда в разреженных газах и, в частности, катодных лучей, испускаемых отрицательными электродами в газовом разряде, привело Крукса, Перрена и Дж. Дж. Томсона к открытию отрицательного электрона.

Катодные лучи представляют собой эмиссию электронов, т. е. поток отрицательных электронов, испускаемых металлом катода под действием бомбардировки катода атомами или молекулами газа. Последние заряжены положительно вследствие потери одного или более электронов под действием самих катодных лучей и сильно притягиваются к катоду под действием его отрицательного заряда.

Впоследствии оказалось, что эти отрицательные электроны являются составной частью сложного излучения радиоактивных веществ, известного под названием β-излучения. Эти лучи испускаются с огромной скоростью, приближающейся к скорости света в процессе некоторых превращений, которые, как мы уже указывали, представляют собой последовательные ступени самопроизвольного радиоактивного распада.

Электроны являются спутниками ядер и вращаются вокруг них на расстоянии, определяющем размеры атома; при этом они удерживаются силами притяжения между их отрицательными зарядами и положительным зарядом ядра. Распределение электронов между центром и периферией атома в настоящее время известно для всех химических элементов, главным образом, благодаря исследованиям датского физика Нильса Бора.

В химических соединениях, образующихся путем обмена электронов между атомами, участвуют лишь самые поверхностные электроны атома, что объясняет сравнительную слабость энергии обычных химических реакций, совершенно не затрагивающих ядер; вследствие этого атомы полностью сохраняют свою индивидуальность.

III

В настоящее время мы знаем, что хотя (с точки зрения химии) разнообразие атомов чрезвычайно велико, вещество в основном состоит из двух компонент — отрицательных электронов (открытых первыми) и протонов, или водородных ядер, несущих положительный заряд (равный и обратный по знаку заряду электрона) и обладающих массой, в 2000 раз превосходящей массу электрона. Таким образом, атом водорода оказывается состоящим из протона и электрона, удерживаемых рядом друг с другом в результате взаимного притяжения их электрических зарядов. Следовательно, можно считать, что все другие виды атомов представляют собой результат конденсации некоторого количества атомов водорода.

Говоря более точно, это не что иное, как теория единства материи, сформулированная английским физиком Праутом за 150 лет до нашего времени, правильность которой доказана только 30 лет назад.

В 1932 г. работы Боте и Беккера в Германии, Фредерика и Ирены Жолио Кюри во Франции и Чадвика в Англии завершились открытием нейтрона. Как показывает само название, нейтрон представляет собой электрически нейтральную частицу, которая может рассматриваться как результат взаимодействия между протоном и отрицательным электроном, взаимодействия более тесного, чем в случае водородного атома *. Масса нейтрона равна или даже несколько больше массы протона, или водородного атома. Это означает, что энергия нейтрона выше

* В настоящее время установлено, что нейтрон нельзя считать соединением протона и электрона. Нейтрон столь же «элементарен», как и протон, т. е. не состоит ни из каких других частиц, известных в настоящее время. Однако нейтрон обладает способностью превращаться в протон, а протон — в нейтрон (см. прим. ред. на стр. 349). — *Прим. ред.*

энергии нормального водородного атома. Хотя этот факт еще не получил экспериментального подтверждения, однако из него следует, что свободный нейтрон неустойчив и должен самопроизвольно превращаться в атом водорода с испусканием излучения. С другой стороны, свободный нейтрон будет устойчив в том случае, если он соединен в надлежащем отношении с протонами, образуя ядра других элементов, за исключением ядер водорода и изолированных протонов. В электрически нейтральном атоме образованное таким образом ядро окружено электронами, число которых равно числу протонов в ядре.

Таким образом, нейтрон в соединении с протоном образует недавно открытое стабильное ядро так называемого дейтерия, или, говоря иначе, тяжелого водорода. Так как это ядро содержит лишь один протон, то соответствующий нейтральный атом, в свою очередь, содержит также лишь один электрон. Поэтому с химической точки зрения, т. е. с точки зрения электронного обмена с другими атомами, дейтерий ведет себя аналогично обычному водороду. В частности, он вступает в соединение с кислородом в отношении двух атомов дейтерия на один атом кислорода, образуя тяжелую воду. Тяжелая вода играет очень важную роль в технике приготовления атомных бомб, ибо она способна замедлять быстрые нейтроны, испускаемые при некоторых реакциях искусственного распада, благодаря чему облегчается осуществление превращений, аналогичных тем, которые породили эти нейтроны. Подобным же образом, два нейтрона в соединении с двумя протонами образуют ядро гелия, которое часто называют гелионом или α-частицей. Электрически нейтральный атом гелия, кроме ядра, содержит еще два электрона.

В качестве примеров особенно устойчивых и часто встречающихся в природе ядер можно назвать: ядро углерода, состоящее из шести нейтронов и шести протонов, ядро азота — из семи нейтронов и семи протонов и ядро кислорода — из восьми нейтронов и восьми протонов.

По мере продвижения по периодической системе элементов число нейтронов, необходимое для образования устойчивого ядра, возрастает быстрее, чем соответствующее число протонов. Таким образом, в ядре урана содержится 146 нейтронов и 92 протона; для образования нейтрального атома к этому числу следует прибавить 92 электрона, распределенных определенным образом между центром и периферией атома. Мы видим, что каждый атом характеризуется двумя числами: количеством протонов и количеством нейтронов. Число протонов в ядре (так называемый атомный номер) равно числу отрицательных электронов вне ядра в нейтральном атоме. Как мы видели, это число определяет химические свойства элемента, а следовательно, и его место в менделеевской таблице элементов. Затем мы имеем определенное

число нейтронов в ядре. Так как масса нейтрона очень мало отличается от массы протона или водородного атома, то масса атома, по сравнению с массой водородного атома, равна приблизительно сумме числа протонов и нейтронов в ядре. Это число всегда является целым числом и носит название массового номера. С точки зрения теории единства материи, это есть число атомов водорода, которое должно быть сконденсировано для образования того или иного атома, т. е. 2 для дейтерия, 4 для гелия, 12 для углерода, 14 для азота, 16 для кислорода и т. д., кончая 238 для урана.

Опыт показал, что масса всех атомов, кроме водородного, всегда несколько меньше (но на величину, не превышающую 1%) произведения его массового номера на массу атома водорода, т. е. общей массы водорода, сконденсированного для образования данного атома. С точки зрения инерции энергии, это означает, что общее количество энергии в атоме меньше количества энергии всех сконденсированных атомов водорода, причем разница испускается в виде излучения в процессе образования атома. Таким образом, зная точный атомный вес, по разности между начальным и конечным состояниями, можно определить количество энергии в каждом атоме, а также количество энергии, освобожденной в процессе превращения. С помощью прибора, известного под названием масс-спектрографа, усовершенствованного английскими физиками Дж. Дж. Томсоном и Астоном, масса атома может быть измерена с точностью до одной десятитысячной.

В новой технике радиоактивных превращений результаты, получаемые с помощью масс-спектрографа, используются для предсказания количества энергии, освобождаемой в процессе более глубоких реакций между атомными ядрами; эти результаты неизменно подтверждаются опытом.

Каждому данному числу протонов, характеризующих химическую индивидуальность атома, соответствует различное число нейтронов, могущих быть присоединенными к ним для образования устойчивого ядра (как мы уже видели, это число не может быть меньше числа протонов). Таким образом, учитывая неустойчивые ядра, образующиеся в процессе превращения, можно сказать, что каждый химический элемент, определяемый атомным номером (числом протонов в ядре и электронов, окружающих ядра в нейтральном атоме), может содержать несколько сортов атомов, различающихся между собой числом нейтронов, связанных с протонами в ядре, массовым номером и атомным весом. Это находится в противоречии с прежними представлениями атомной теории, рассматривавшей все атомы химического элемента как совершенно идентичные, но соответствует недавнему открытию так называемых изотопов, т. е. атомов, имеющих одинаковые химические свойства, но различную массу.

Например, дейтерий является изотопом обыкновенного водорода. В природе дейтерий содержится в водороде в очень ничтожных количествах: 1 на 30 000. Тяжелая вода содержится также в обыкновенной воде, однако в такой же ничтожной пропорции, и может быть (хотя и с трудом) выделена в чистом виде.

Соединяя семь нейтронов с шестью протонами углерода, можно получить стабильный изотоп (с массой 13) обычного углерода (масса 12). Подобным же образом, наряду с обычным азотом 14 существует азот 15 и кислород 17 и 18 в смеси с обыкновенным кислородом 16.

Применение масс-спектрографа, позволяющего с большой точностью измерить массы отдельных атомов, показало широкое распространение изотопов в природе и дало возможность определить для каждого химического элемента число стабильных изотопов, а также соотношения, в которых последние встречаются в природных соединениях, — соотношения, остающиеся неизменными при всех химических реакциях, которые не в силах их разрушить. По той же причине химические методы определения атомных весов могут дать лишь средние значения весов изотопов в смесях. Поэтому получаемые таким путем данные значительно уступают результатам измерения с помощью масс-спектрографа, в особенности по вопросу о количестве энергии в атомах различных сортов.

Этим путем удалось доказать, что большинство химических элементов, встречающихся в природе, представляет собой смесь различных изотопов, причем число последних в некоторых случаях, например в олове и ртути, доходит до десяти. Уран также представляет собой смесь нескольких изотопов. Новейшие исследования радиоактивных превращений, в процессе которых удалось доказать существование в течение более или менее продолжительного времени неустойчивых ядер, обнаружили также ядра с одинаковым числом нейтронов и протонов, но различающиеся между собой по количеству энергии. Это так называемые изобарные изотопы (имеющие одинаковые атомные и массовые номера), ядра которых состоят из тех же элементов, но имеют различную структуру. Эти различия обуславливают различную стабильность изотопов, т. е. различную скорость самопроизвольного распада и возвращения к более устойчивым формам с более низкой энергией.

Существование устойчивой ядерной структуры, повидимому, возможно только в тех случаях, когда общее число протонов и нейтронов не превышает по порядку величины соответствующего числа в изотопах свинца, т. е. около 200. Строение ядер урана и тория или радиоактивных элементов, промежуточных между торием и свинцом, отличается чрезвычайной сложностью и подвержено самопроизвольным случайным превращениям, причем ядра

проходят через ряд внутренних конфигураций, сопровождающихся выбрасыванием осколков и освобождением энергии в форме кинетической энергии этих осколков или излучения, аналогичного рентгеновскому излучению (γ-лучи радиоактивных веществ). Таким образом, самопроизвольная радиоактивность приводит к испусканию отрицательных электронов (β-лучи радиоактивных веществ) или ядер гелия (гелионов), которые особенно устойчивы (α-излучение радиоактивных веществ). При испускании β-лучей нейтрон ядра превращается в протон, и массовый номер остается неизменным, в то время как атомный номер увеличивается на единицу. В случае испускания α-лучей ядро одновременно теряет два нейтрона и два протона, причем массовый номер уменьшается на четыре единицы, а атомный — на две единицы. В обоих случаях наблюдается изменение химических свойств в связи с тем, что число внешних электронов в нейтральном атоме, равное атомному номеру, в первом случае увеличивается на единицу, а во втором — уменьшается на две единицы. Опыт полностью подтвердил правильность этого объяснения. Нетрудно видеть, что эти превращения, изменяющие самое строение ядер и обнимающие реакции между протонами, электронами и нейтронами, сопровождаются освобождением количеств энергии, огромных по сравнению с энергией обычных химических реакций, в которых участвуют лишь самые внешние поверхностные электроны атомов — электронные оболочки. Эти самопроизвольные превращения, обусловленные исключительно условиями внутри радиоактивного ядра, протекают со скоростью, не зависящей от внешних условий, как, например, от химической комбинации атомов или от изменения температуры или давления. Все эти факторы затрагивают только периферию атома и никак не отражаются на условиях внутриатомного ядра, защищенного всеми промежуточными электронами.

IV

Первый шаг в области искусственных радиоактивных превращений на пути создания новой химии ядерных реакций был сделан 30 лет назад Резерфордом, показавшим, что α-частицы, вылетающие при некоторых самопроизвольных превращениях (например, радия в эманацию или полония в свинец), встречаясь с другими ядрами, вызывают превращение последних. Так, α-частица (ядро гелия) при столкновении с обыкновенным ядром азота (14) проникает в него, выбивает оттуда протон и образует ядро кислорода (изотоп 17). Это был первый пример ядерной реакции, первый случай искусственного превращения, при котором путем воздействия гелием на азот получаются водород и кислород.

Открытие нейтрона стало возможным потому, что некоторые из этих реакций, например реакция между α-частицами и ядром бериллия, сопровождаются выбиванием изолированного нейтрона, который в течение короткого промежутка времени существует в свободном состоянии и доступен наблюдению.

Число уже изученных реакций довольно значительно; оно особенно возросло после того, как применение мощных электростатических машин, дающих разность потенциалов порядка миллиона вольт, а также циклотронов, дало возможность ускорить движение некоторых ядер, в частности протонов, дейтронов и гелионов, и сообщить им кинетическую энергию порядка энергии частиц, получающихся при некоторых самопроизвольных радиоактивных превращениях. Благодаря этому частицы приобретают способность преодолеть электрическое отталкивание между их собственным электрическим зарядом и зарядом ядра, с которым они должны вступить в реакцию.

Однако наиболее эффективным агентом в этой специальной ядерной химии является сам нейтрон. Будучи устойчивым только внутри ядра, нейтрон стремится внедриться в ядра, в результате чего он притягивается ядрами, а не отталкивается от них подобно другим ядрам. Превращения, вызванные нейтронами, осуществляются тем легче, чем медленнее движение нейтронов и чем более чувствительными они являются к воздействию ядер, мимо которых пролетают. Чрезвычайно интересно, что такая фиксация нейтрона на ядре значительно облегчается в тех случаях, когда скорость нейтрона приближается к некоторому значению, носящему название резонансного и вполне определенному для каждого ядра.

Сначала предполагалось, что реакции между ядрами или ядрами и нейтронами протекают мгновенно, однако в 1934 г. Ирена и Фредерик Жолио Кюри, исследуя открытое ими явление искусственной радиоактивности, показали, что каждая реакция осуществляется путем настоящего радиоактивного процесса, состоящего из одной или нескольких ступеней, характеризующихся определенным ритмом. Отдельные стадии процесса протекают с наблюдаемой скоростью, что дает возможность продемонстрировать явление искусственной радиоактивности. Сказанное справедливо, например, для того случая, на котором супруги Жолио Кюри впервые наблюдали это явление. Подвергая алюминиевую пластинку действию α-лучей полония, они заметили, что после того, как воздействие прекращалось, пластинка продолжала испускать лучи, интенсивность которых уменьшалась наполовину по истечении примерно четырех минут, причем излучение состояло из быстрых положительных электронов, что никогда не наблюдается при естественном распаде радиоактивных семейств элементов. Этот факт объясняется следующим образом: α-части-

цы, испускаемые полонием при превращении его в свинец, попадая на ядра алюминия, вызывают практически мгновенное испускание нейтрона, так что получается ядро неустойчивого изотопа фосфора. Последний в течение довольно продолжительного времени, равного приблизительно четырем минутам, переходит в устойчивый изотоп кремния с испусканием положительного электрона.

Самая неустойчивость этих ядер и соответствующих атомов объясняет, почему мы не наблюдаем их в природе. Равным образом, огромность константы распада радия и тория является причиной того, что количество этих элементов не уменьшилось со времени отделения Земли от Солнца миллиарды лет тому назад. Радиоактивный распад этих элементов продолжается до настоящего времени и позволяет наблюдать это явление как на самих элементах, так и на последовательных продуктах их распада.

Открытие искусственной радиоактивности оказалось необычайно плодотворным. За последние несколько лет путем бомбардировки существующих в природе ядер протонами, дейтронами, гелионами и нейтронами было получено более семисот новых сортов радиоактивных атомов. Некоторые из них чрезвычайно интересны для физики и медицины, так как с успехом могут быть использованы для замены природных радиоактивных веществ.

V

Самой важной ядерной реакцией, лежащей в основе действия атомной бомбы, является взаимодействие нейтронов с некоторыми сложными ядрами, как, например, с ядром урана. В частности, Жолио показал, что в результате поглощения нейтрона эти ядра становятся чрезвычайно неустойчивыми и взрываются. При этом освобождается значительное количество энергии и выбрасываются осколки, среди которых имеются два тяжелых радиоактивных ядра и нейтроны, в свою очередь вызывающие взрыв других ядер, аналогичных первому. Таким образом, превращение распространяется по всему веществу, специально приготовленному для этой цели. Процесс распространяется, подобно пожару. В качестве затравки используется первичное освобождение нейтронов, для чего служит небольшое количество природного радиоактивного вещества, воздействующего посредством испускания частиц на бериллий или другое подходящее вещество.

Необходимым условием для распространения процесса превращения, осуществляющегося посредством нейтронов, выделяющихся в ходе самого процесса, является наличие вблизи исход-

ного центра достаточной концентрации соответствующего вещества для того, чтобы обеспечить достаточную вероятность столкновения между ядрами этого вещества и нейтронами, прежде чем последние исчезнут тем или иным образом. Если концентрация недостаточно высока, процесс не может распространяться дальше, подобно тому, как горение угля прекращается, если к нему примешано слишком большое количество инертного материала. Это обстоятельство может помочь устранению одного опасения, часто высказываемого в публике. Нередко задается вопрос: не может ли процесс превращения, начавшийся в атомной бомбе или сверхмощной центральной силовой станции будущего, использующей уран вместо угля или нефти, распространиться дальше, подобно лесному пожару, вызванному нечаянно брошенной спичкой, и таким образом взорвать весь земной шар? На этот вопрос можно с полной уверенностью ответить отрицательно. Аналогия с лесным пожаром не выдерживает критики, потому что процесс превращения, вызываемый и используемый в настоящее время, не может распространяться бесконечно вследствие отсутствия горючего материала. Вещество, используемое в процессе превращения, не в состоянии вызвать распада окружающих его веществ, подобно тому как уголь, горящий в камине, не может зажечь кирпичей, из которых сложен камин, несмотря на то, что в них содержится некоторое количество углерода. Количество урана и близких к нему элементов в горных породах настолько ничтожно, что не в состоянии поддержать распространение процесса с помощью нейтронов. Это соображение приложимо ко всем другим известным нам ядерным реакциям. То, что мы знаем о массах атома, показывает, что огромное большинство атомов, из которых состоит земной шар, благодаря низкому содержанию энергии настолько устойчивы, что их превращение не только не может высвободить энергию, но и само может осуществиться только при условии притока энергии извне. Таким образом, всякую вероятность катастрофы, во всяком случае катастрофы этого типа, можно считать абсолютно исключенной.

Единственная реальная катастрофа, угрожающая человечеству, явится следствием использования нового оружия для разрушительных целей. Борьба с этой опасностью и применение новой техники, основанной на ядерных реакциях, на благо человечества зависят от нас самих. Новая техника дает нам неисчерпаемый источник энергии, которая с помощью электричества может быть направлена туда, где в ней ощущается необходимость, подобно тому как кровеносная система доставляет необходимое питание всем отдельным клеточкам организма.

Жолио уже перед войной, изменившей направление предполагаемых им работ, предвидел возможность создания центральных установок, из которых каждая должна была давать в год

300 000 киловатт энергии при затрате только одной тонны урана вместо трех миллионов тонн нефти или угля, требуемых для этой цели в настоящее время.

Это количество энергии представляет собой одну десятую энергии, генерируемой всеми силовыми установками Франции; так что вся годовая потребность страны в электроэнергии может быть покрыта при затрате менее чем десяти тонн урана, — количество, помещающееся на одном грузовике.

Нетрудно вычислить, что количество энергии, приходящееся, таким образом, на одного человека, выраженное в эквиваленте механической энергии, будет равносильно работе десяти человек. Таким образом, средняя семья будеть иметь в своем распоряжении от 40 до 50 послушных и молчаливых «рабов», не требующих питания и надзора. Эти «рабы», приводимые в движение электричеством, будут обслуживать шахты, каменоломни, заводы для переработки сырья, сельское хозяйство и индивидуальные жилища, а также все расширяющуюся транспортную сеть.

Материальное освобождение повлечет за собой духовное освобождение и дальнейшее культурное развитие, которое будет не только возможно (благодаря наличию свободного времени), но и необходимо для обслуживания механизмов все вырастающей сложности.

В эпоху возникновения капитализма, в связи с необходимостью повышения производительности труда рабочего и увеличения прибавочной стоимости, возникла потребность в сообщении ему некоторого минимума сведений (чтение, письмо и арифметика), которые и составили программу так называемого начального обучения.

В новой, атомной эре возрастающая сложность машин и задачи их эксплоатации в человеческом обществе, единство и спайка будут непрерывно возрастать и потребуют от каждого человека значительно более высокого уровня знаний и более широкого и полного понимания структуры вселенной и законов, управляющих природой и человеком.

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ
ИЛИ СОЛИДАРНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ И МЫСЛИ *

Прошло ровно 200 лет с тех пор, когда в 1745 г. Дени Дидро, в возрасте 32 лет, согласился руководить делом, сначала представлявшим собой всего лишь перевод английского словаря Эфраима Чамберса, вышедшего в 1728 г., а затем благодаря гению Дидро превратившимся в создание самого характерного памятника французской мысли XVIII в., в создание Энциклопедии, или рационального словаря наук, искусств и ремесл.

Возбуждая энтузиазм одних и страстную враждебность других, это дело продолжалось в течение почти тридцати лет, преодолевая тысячи материальных и моральных препятствий. Первый том Энциклопедии появился через шесть лет, 1 июля 1751 г., с вступительной статьей Даламбера; последний из одиннадцати добавочных томов с чертежами и гравюрами должен был появиться лишь в 1772 г., а спустя несколько лет — дополнительно еще пять томов с текстом и два тома указателей.

Энциклопедия была по необходимости коллективным делом, чрезвычайно трудно осуществимым. Мишле говорит: «Дидро преодолел препятствия силой величия. В обширном предприятии к сонму литераторов присоединился сонм финансистов. Целые состояния были с ним связаны, из которых некоторые безвозвратно. Одна дама вложила в это дело сто тысяч экю. Многие отдали этому предприятию всю свою жизнь (де Жанкур и многие другие). Благородство Дидро расходовалось здесь почти даром: он с трудом имел свой хлеб, но благородство победило. Можно было видеть поразительное зрелище: эгоизм и зависть исчезли. Кто мог бы подумать, что нация литераторов, как выражается Даламбер, нация соперников и завистников пожертвует собой для дела, в котором каждый в отдельности может так мало блистать. Вавилонская башня в алфавитном порядке, невиданный словарь в тридцать томов in folio, Энциклопедия была нечто большее, чем книга, — это был революционный заговор. Несмотря на преследования, он неуклонно развивался; в него вовлечена была вся Европа. Прекрасный заговор титанов,

* Речь Поля Ланжевена, произнесенная 10 июня 1945 г. — *Прим. ред.*

он сделался заговором всех. Вся Троя расположилась внутри троянского коня».

Под знаком разума. Дух и содержание Энциклопедии отлично определены своим названием: «Рациональный словарь наук, искусств и ремесл». И действительно, Энциклопедия определялась прежде всего разумом, который, по твердому убеждению ее руководителей, дает окончательное решение, согласно картезианскому методу.

Как говорит во вступительной статье Даламбер, Декарт осмелился показать здравомыслящим людям, как стряхнуть иго схоластики, предвзятых мнений и ложных авторитетов, одним словом — предрассудков и варварства, и путем этого возмущения, плоды которого мы собираем сегодня, он оказал философии более важную услугу, чем все его знаменитые преемники.

Если в области математики достаточно разума, то при построении или изложении естественных наук разум должен прибегать к экспериментальному методу, выдвинутому Галилеем и разработанному Бэконом, — методу, который вот уже в течение более трех веков показывает свою исключительную плодотворность. Энциклопедисты призывают ставить вопросы природе и пользоваться этим в области наук так же, как они исследуют выражение природы в искусствах. Не менее интересным и великим достижением гения Дидро являются созданные им критика искусства и первые публичные выставки, называемые салонами.

Значение ремесл. Самой оригинальной чертой Энциклопедии является важная роль в ней ремесл. Впервые были ясно показаны глубокая связь между наукой и техникой, теорией и практикой, мыслью и действием и их взаимное оплодотворение в развитии человеческого прогресса. Начали понимать то, что мы ясно видим сегодня: Homo faber и Homo sapiens составляют одно целое. Наука, возникающая из потребностей действия и единственно способная оплодотворять его, может расти только в том случае, если она через опыт прибегает к действию и все шире использует способы действия, даваемые в ее распоряжение техникой. Мы знаем, что рука человека посредством орудий труда создала мозг и что мысль, порожденная действием, должна, согласно древнему мифу об Антее, чтобы остаться сильной и плодотворной, обратно вернуться к действию, внушая ему все более богатые и более высокие формы.

Сам Дидро пишет в своем проспекте: «Часть механических искусств требует таких же подробностей и столько же забот, как и науки. До сих пор почти ничего не писали по этому предмету. Вот почему мы вынуждены были прибегнуть непосредственно к рабочим. Обратились к самым искусным мастерам Парижа и всего королевства. Пришлось отправиться в мастерские, расспрашивать рабочих, писать под их диктовку, развивать их

мысль, узнавать от них специальные термины их профессии, составлять таблицы и определения терминов, разговаривать с теми, от которых были получены заметки, и — предосторожность почти необходимая — исправлять в длительных беседах с одними то, что́ другие объясняли несовершенным образом, темно, а иногда и неверно».

Другой аспект тесной солидарности мысли и действия, которого не предвидели даже авторы Энциклопедии, соответствует той роли, которую Энциклопедия сыграла в политической жизни Франции, в возникновении французской революции.

Густав Лансон так говорит: «Благодаря Дидро Энциклопедия оставалась такой, какой он ее задумал, — картиной всех знаний, которые обнаружили могущество и прогресс разума, апофеоз цивилизации и науки, искусств и промышленности, которые улучшают интеллектуальные и материальные условия жизни человечества. Это была непреодолимая машина, воздвигнутая против духа верований и установлений прошлого».

История Франции, однако, показывает, что начатое таким образом преобразование быстро привело к глубокому разочарованию, из которого мы едва начинаем выходить и в котором я вижу одну из причин внутреннего противоречия той концепции, которой наука следовала с начала XVIII в. В науке господствовали идеи Ньютона, завершившего основание механики, и в частности небесной механики. В них увидели прототип, с которым должна была согласоваться вся наука о природе, в духе механического детерминизма или абсолютного детерминизма, наиболее законченное выражение которого заключено в хорошо известной фразе Лапласа: «Ум, который в данный момент знал бы все силы, движущие природу и относительную структуру составляющих ее существ, и который при этом был бы достаточно объемлющим, чтобы подчинить все данные анализу, — этот ум охватил бы в одной и той же формуле движение самых больших тел во вселенной и движение самого легкого атома. Ничто для него не было бы неопределенным; как и прошлое, ему было бы известно и будущее». Все усилия человеческого духа непрерывно направлены к такому уму, от которого он всегда будет бесконечно далек.

Основное противоречие. Необходимо подчеркнуть сверхчеловеческий характер этого идеала, предложенного науке.

Дидро в своем «Объяснении природы» говорит о Мопертюи, что он так определил животное: «...система различных органических молекул, которые путем импульса ощущения, подобного тупому и глухому прикосновению, — свойству, которое дал им тот, кто создал материю, — сочетаются до тех пор, пока каждая из них не находит самое подходящее место для конфигурации своего покоя».

Ламетри в том же порядке написал свою книгу «Человек — машина».

Если исходить из того, что наше прошлое и наше будущее содержатся в первоначальном толчке, данном огромному материальному снаряду, которому механический детерминизм уподобляет вселенную, то получается, будто поведение человека и науки может быть лишь созерцательным, каким оно является в астрономии; но это приведет к фатализму вместе с парадоксом, что наука, вытекающая из потребностей действия, приходит лишь к отрицанию самой возможности действия.

Отсюда то замешательство, которое господствовало в течение всего XIX в., со времени отчаяния романтиков до разрыва между наукой и философией, выражавшегося в постоянных утверждениях о несостоятельности науки и поисках спасения в бергсоновской интуиции, в метафизическом идеализме, оторванном от реальной почвы; в то же время наука рассматривалась лишь в утилитарном смысле — как источник материальной силы и эгоистической выгоды. Разрыв науки и справедливости привел к ужасным последствиям, которые мы ощущаем еще и теперь. Наконец, это был кризис гуманности, во время которого в течение 150 лет наука не могла найти своего места, потому что абсолютный детерминизм лишил ее гуманности, и ее преподавание было направлено скорее к практическому применению, чем для включения в культуру, достойную этого названия.

Основное противоречие, только что мной подчеркнутое, в настоящее время преодолено тем обновлением, которое началось с XVIII в., с момента введения понятия эволюции (от Бюффона и Ламарка), а также путем развития французской науки, заставившего эволюционировать и само понятие разума.

Два века назад разум понимался как статический вместе с кантовскими абсолютными категориями пространства и времени и аристотелевской логикой. Обновление началось в области математики с введения неэвклидовой геометрии и с момента открытия противоречий, возникающих в связи с теорией множеств. Затем движение захватило физику, которая в течение 50 лет испытывает существенные кризисы. Кризис относительности, вызванный противоречием между классическими понятиями пространства и времени и результатами опыта, был преодолен в ограниченной относительности лишь эйнштейновским синтезом пространства и времени и в обобщенной относительности лишь синтезом физики и геометрии, где физика приобрела совершенно новый аспект.

Начавшийся почти одновременно кризис квантов, не закончившийся еще и теперь, ведет к более глубоким последствиям в том отношении, что он затрагивает само понятие детерминизма

и возвращает науке ее человеческий характер, восстанавливая действие в его правах.

Новая физика фактически заменяет абсолютный детерминизм статистическим, в силу которого наше действительное знание материальной системы позволяет нам предвидеть только вероятности. Что же касается различных возможных последующих состояний этой системы, то следует сказать, что вероятности тем более расплывчаты, чем более далеки предвидения. Для систем нашего масштаба и для большей части практических применений вероятность может приближаться к уверенности, обеспечивая развитие техники, но она рассеивается, как пучок света, проходящий через маленькое отверстие, когда материальная система приближается к размерам атома *.

Посредством следующего основного положения: *«наши возможности предвидения зависят прежде всего от нашей информации, а последняя может увеличиваться только путем действия»*, новая концепция детерминизма достигает опыта повседневной жизни и делает из нашей науки точную и все более совершенную форму. Она очеловечивает также науку и заменяет созерцательную и слегка отчаявшуюся позицию абсолютного детерминизма активной позицией, в которой осуществляется синтез субъекта и объекта и где одни могут преобразовать других без того, чтобы какой-то неумолимый рок мог заранее установить предел этого действия.

Преодоленные противоречия. Итак, опыт показывает, что наш разум и наука, создаваемая им в процессе все большего приспособления к действительности, как все живые существа и как сама вселенная, подвержены закону эволюции; последняя проходит через ряд кризисов, где каждое противоречие или преодоленное препятствие ведет к новым обогащениям.

---

* В современной физике роль статистики в познании микропроцессов возросла в значительной степени. Однако нельзя считать правильным утверждение, будто современная физика дает знание, позволяющее предвидеть *только* вероятности событий, происходящих в материальных системах. Прежде всего, мы должны подчеркнуть тот факт, что такие законы природы, как закон сохранения и превращения энергии, закон сохранения количества и момента количества движения, заряда, массы, составляющие основу всякого познания макро- и микропроцессов, не носят статистического характера. Они позволяют с полной определенностью и однозначностью предвидеть существенные черты явлений, а не только их вероятности. С другой стороны, даже закономерности квантовой механики, наиболее широко использующей статистический метод, дают возможность однозначно определять, например, возможные значения энергии микросистем. Все выводы квантовой механики существенно опираются на основной динамический закон, однозначно (а не вероятностно) определяющий изменение состояния микрообъектов во времени. Все это и позволило Ланжевену в другом месте заявить, что объективную детерминированность явлений в настоящее время мы знаем лучше, нежели знали ее прежде. — ***Прим. ред.***

Говоря о физико-химических науках, мне хочется напомнить, что основные противоречия между теорией неподвижного эфира и опытами, относящимися к распространению света в движущихся телах, были преодолены синтезом пространства и времени, а противоречие между небесной механикой Ньютона и астрономическим опытом преодолены физико-геометрическим синтезом пространства и времени, свойства которого определены материей и излучением.

Прежнее противоречие между двумя понятиями материи и света дает место понятию энергии, которая то материализуется путем преобразования излучения в материальные частицы, то дематериализуется путем обратного превращения *. Начиная с конца XVII в. боролись две теории, чтобы установить свойства света: теория эмиссии и теория волн. В середине XIX в. считали, что спор решен в пользу волновой теории. Новая механика, вытекающая из теории относительности, нарушила этот вывод и позволила квантовой теории поставить вопрос диалектически. Вопрос заключается не в том, чтобы исключить одну из этих двух концепций — корпускулярную или волновую, а, наоборот, в том, чтобы осуществить между ними синтез, так как изучение природы света показывает, что обе эти концепции заключают в себе зерно истины.

Волновая механика, созданная Луи де Бройлем, показывает, что аналогичный синтез необходим для того, чтобы понять свойства материи. Этот синтез пока еще не завершен и для света. Это — дело будущего, и завершение его будет означать существенный успех физики.

История развития химии на протяжении всего XIX в. двигалась противоречием между теорией единства материи, которая в каждом атоме предполагает результат конденсации целого числа атомов водорода, и опытом, который показывает, что атомные массы различных элементов не соответствуют в точности целому числу масс атома водорода. Доктрина инертности энергии, вытекающая из теории относительности, одним ударом преодолела затруднение и осуществила синтез между фактами, которые до сих пор представлялись противоречивыми. Больше того, незначительные расхождения между атомными массами элементов и целым числом масс атомов водорода позволяют нам определить энергию, освобожденную в виде излучения, поскольку конденсированный атом образуется из водорода.

* Здесь Ланжевен выражается крайне неточно. Как мы уже отмечали, противопоставление света (излучения) материи неправомерно. Излучение, как и вещество (которое Ланжевен только и называет материей), является одной из форм материи. Поэтому экспериментально установленный факт превращения излучения в вещество и вещества в излучение есть не какие-то процессы «материализации» и «дематериализации» излучения, а закономерное превращение одной формы материи в другую. — *Прим. ред.*

Подобными диалектическими процессами богата история всех наук, особенно на решающих этапах их развития. Следует признать, что я хорошо понял историю физики только с того момента, когда познакомился с основными идеями диалектического материализма. Эта доктрина, продолжающая великую линию прогресса философской мысли человечества, в свою очередь сама является результатом синтеза, начатого столетие назад Марксом и Энгельсом, между механистическим материализмом французских философов XVIII в. и идеалистической диалектикой Гегеля *.

Она применима в качестве философии изменений и непрестанной эволюции мира как в области мысли, чтобы осветить и направлять развитие нашей науки и деятельности, так и в области самой природы. Последняя, в противовес старой формуле: «природа не делает скачков», повидимому, развивается скачками — и в отношении появления новых форм жизни и в отношении перехода атома из одного квантового состояния в другое.

Основоположники этой доктрины впервые применили ее к эволюции человеческих обществ под названием *исторического материализма;* это учение позволило им, как и их преемникам, понять происходящее и предвидеть будущее даже в этой особенно трудной и сложной области.

В отношении плана действий, когда доктрина превращается в метод, диалектический материализм, повидимому, так же плодотворен, как и в отношении плана объяснения. Он позволяет расширить и обогатить самый экспериментальный метод.

Я пытался показать, какие изменения произошли за последние 200 лет в наших наиболее фундаментальных идеях, касающихся как природы разума, так и природы материи, показать, что наука испытала за это время глубочайшие преобразования, с которыми можно сравнить лишь перевороты в технике, тесно связанные и находящиеся в постоянном взаимодействии с развитием науки.

---

* Ланжевен неправильно характеризует диалектический материализм как якобы простой «синтез» механистического материализма XVIII в. и идеалистической диалектики Гегеля. В действительности, как указывал тов. А. А. Жданов, «возникновение марксизма было настоящим открытием, революцией в философии. Конечно, как и всякое открытие, как и всякий скачок, перерыв постепенности, всякий переход в новое состояние, оно, это открытие, не могло произойти без предварительного накопления количественных изменений, в данном случае итогов развития философии до открытия Маркса—Энгельса. ...Маркс и Энгельс создали новую философию, качественно отличающуюся от всех предыдущих, хотя бы и прогрессивных, философских систем» («Вопросы философии», № 1, 1947, стр. 258).

Классики марксизма не раз подчеркивали коренную противоположность марксистского диалектического метода и диалектики Гегеля, решающие отличия марксистского философского материализма от всего домарксового материализма. — *Прим. ред.*

Настоящий момент, когда после беспрецедентного кризиса наша страна должна возрождаться, является наиболее благоприятным, чтобы спустя два столетия предпринять нечто подобное тому, чем занимался и руководил Дидро, начиная с юных лет своей жизни. Путеводной нитью в нашем тяжелом и долгом предприятии должен быть диалектический материализм, связывающий нас с магистральной философской линией человеческого прогресса.

Мы могли бы собраться сегодня лишь для того, чтобы должным образом отметить дату — чего она, несомненно, заслуживает — двухсотлетия памятной публикации Энциклопедии XVIII в. Но чтобы и здесь объединить мысль с действием, организаторы этого собрания хотели бы, чтобы оно было также отправным пунктом движения, возобновляющего то замечательное дело, которое предшествовало нашей революции. Всем вам следует об этом подумать и содействовать этому по мере своих сил.

МЫСЛЬ И ДЕЙСТВИЕ *

Господин Орсель только что напомнил вам одну из целей, которые преследует серия докладов, открываемая в этот вечер перед вами. В выбранном для этой серии названии «Французская политика науки» употребляются два слова: «наука» и «политика»; это название было комментировано г-ном Орселем в том смысле, что признанной всеми нами обязанностью научного деятеля является обязанность жить не вдали от других людей, а интересоваться гражданской жизнью, расширяющейся благодаря прогрессу науки до пределов понимания интересов всего человечества.

Это название можно понимать и в несколько ином смысле, в смысле организации научной деятельности в нашей стране.

Что касается названий докладов, следующих за моим докладом, то они относятся скорее ко второй интерпретации.

Я постараюсь рассмотреть оба аспекта, которые, кстати, соответствуют наименованию моего доклада «Мысль и действие».

Прежде всего, я рассмотрю вторую точку зрения, касающуюся отношения между мыслью и действием в области естественных наук и их применений, имеющих целью материальное освобождение человека, и затем перейду к политическому аспекту этого вопроса, а именно — покажу, как на людей науки все в большей и большей мере возлагается обязанность следить за практическим применением открытых ими возможностей.

Их мысль не должна быть безразличной к тому действию, которое из нее вытекает.

Наука и техника. Прежде всего мне хотелось бы подчеркнуть все более и более усиливающуюся тесную связь, так сказать, взаимное оплодотворение, между мыслью и действием, между наукой и техникой, между теорией и опытом или, как

---

* Доклад, сделанный проф. Ланжевеном на собрании Французского университетского союза (Union Française Universitaire) 10 мая 1946 г.; воспроизводится с некоторыми сокращениями. Докладу Ланжевена предшествовало вступительное слово президента этого союза Ж. Орселя. — *Прим. ред.*

говорят наши советские друзья, между теорией и практикой — расширенной и повседневной формой опыта.

Наша наука в значительной своей части родилась из необходимости действия. Это хорошо известно в области математики — начиная с арифметики и геометрии и кончая дифференциальным и интегральным исчислениями. Достижения астрономии связаны или с проблемой измерения времени, или с желанием предвидеть относительные положения светил или будущее людей, или же — как в древности и в эпоху Возрождения — с растущими потребностями мореходства.

Оптика, в том виде, в каком она была разработана главным образом Галилеем, Кеплером, Декартом, Ньютоном, шла путем, параллельным пути развития астрономии, стараясь удовлетворить требованиям все большей точности при наблюдении неба.

Приблизительно в то же время развитие механики, начавшееся также с Галилея, Декарта, Гюйгенса и достигшее кульминационного пункта с Ньютоном, было тесно связано с проблемами, которые ставятся баллистикой и астрономией.

Дифференциальное и интегральное исчисления созданы в XVII в. для того, чтобы ответить на вопросы, поставленные механиками, артиллеристами и архитекторами.

В XIX в., когда применение паровых машин стало существенно важным, начали развиваться термодинамика и точное знание законов, которым подчиняются пары и газы. С того времени, как наш великий Сади Карно, находясь под этим влиянием, первым высказал существенные принципы термодинамики, эта наука господствует в значительной части физики, а также в прикладной и чистой химии.

Таким образом, во всех этих примерах потребности в действиях определили собой активность мысли.

И наоборот, если потребность мысли однажды уже проявилась, то потребность в понимании, или то, что я назвал «святым любопытством», не оставит ум в покое до тех пор, пока он не создаст объяснения естественных явлений — в целях ли устранения унаследованного от предков беспокойства, или же, что становится все более явным, с целью умственного удовлетворения.

Результаты этих изысканий, чистая наука, которую они создают, показали, с точки зрения действия, свою удивительную плодотворность при посредстве вызванных ими непредвиденных применений.

Следуя по пути, ведущему к науке через потребности в действии, вы наперед знаете, чего вы хотите, и для достижения своей цели вы ищете все более и более рациональные и точные средства.

Во втором случае — и это особенно примечательно — даже одно стремление к познанию приводит к более неожиданным и чудесным приложениям, чем это могло бы сниться в самых поразительных снах.

Так, например, дело обстоит с открытием Пастера, который, имея отправной точкой чисто физико-химическую проблему, пришел к изучению брожения и затем к открытию микробиологического мира, а следовательно, и к возможности могущественного воздействия на болезни, т. е. к тому, что́ он вначале совершенно не имел в виду и что́ никто не мог бы считать возможным до того, как это выявилось в результате чисто научного исследования.

Такая же неожиданность произошла и с Бертело. Его исследования в области органического синтеза, предпринятые в целях разрешения вопроса о жизненных силах, для того чтобы знать, могут ли продукты, порожденные in vivo, быть получены также in vitro, т. е. могут ли вещества, порождаемые в живых организмах, получаться также искусственным образом и химических сосудах, — дали толчок к исключительно бурному промышленному развитию в области красителей, ароматических веществ, фармацевтических препаратов и пластических масс, и притом с таким разнообразием и богатством, которые превосходят даже самое природу.

Совершенно не подозревавшиеся возможности проявились в особенности в области электричества — прекрасные возможности, восхищаться которыми я не устаю до сих пор.

Возможность связаться в течение менее десятой доли секунды с любым пунктом на поверхности земли при помощи радиотелеграфии, радиотелефонии или телевидения и даже войти в контакт с луной при помощи использования явления отражения герцевских волн превосходит все, что́ могло представить себе самое пылкое воображение 50 лет назад. Ученый или техник, которые поставили бы тогда перед собой априори подобные задачи, были бы сочтены за сумасшедших, — и это было бы вполне справедливо, потому что они не имели бы никаких оснований достигнуть такой цели. И тем не менее все это появилось в результате изысканий, совершенно не заинтересованных в приложениях, относящихся к столь чудесному явлению электрической искры, которая была известна уже в глубокой древности.

Первое применение этих исследований было осуществлено в громоотводе Франклина. Через 100 лет после него началось изумительное развитие электротехники, продолженное затем развитием радиотехники и призванное совершенно изменить условия существования людей.

Никогда нельзя забыть гениального открытия Максвелла,

который только из эстетических соображений и для того, чтобы внести бо́льшую симметрию и связь в уравнения электромагнетизма, изменил некоторые из них и, делая выводы из таким образом измененных уравнений, пришел к возможности существования волн электромагнитной природы, распространяющихся с той же скоростью, что и скорость света.

Отсюда вытекают два следствия, имеющие исключительно важное значение: одно — теоретическое, другое — экспериментальное. С одной стороны, электромагнитная теория света освободила физику от трудностей, оставшихся после Френеля в теории волнообразного распространения света; с другой стороны, после того как Берлинская академия в 1880 г. объявила конкурс на экспериментальное подтверждение идей Максвелла, Генрих Герц в 1887 г. сумел при посредстве электричества получить предвиденные Максвеллом волны и установить у них свойства света с большой длиной волны. Затем этими волнами занялись инженеры, создав нашу современную радиотехнику.

Стремление при помощи изучения разряда в разреженных газах понять механизм электрического тока привело к открытию катодных лучей и зернистой структуры электричества, к открытию электрона — первого этапа, пройденного 50 лет назад при точном исследовании мира атомов.

Первая серия применений, которые раньше, безусловно, не могли быть предусмотрены, — это применение катодных лучей в осциллографии, т. е. к анализу явлений, происходящих в промежуток порядка одной десятимиллионной доли секунды. Отсюда появилась возможность телевидения и радиолокации, которая, едва только возникнув, уже показала свои исключительные возможности. Более удивительной и имеющей возможность еще более чудесных применений является непрерывная цепь открытий, последовавших за катодными лучами, каждое из которых влекло за собой новые открытия: рентгеновские лучи, естественная радиоактивность, затем искусственная радиоактивность, ядерная химия, высвобождение атомной энергии.

Таким образом, мысль не только разрешает проблемы, которые ставятся перед нами потребностью действия, но, больше того, однажды пущенная в ход и строящая «чистую» науку, она показывает свою исключительную плодотворность в создании новых возможностей действия.

Повидимому, можно итти еще дальше и утверждать, что никакое чисто научное изыскание, каким бы абстрактным и «незаинтересованным» оно ни казалось, не остается без того, чтобы рано или поздно не найти своего применения. Другими словами, ни одно усилие мысли не является потерянным для действия.

Я только что дал несколько примеров из области физико-химических наук; так же обстоит дело в других естественных науках, в математике. Так, еще древние геометры, Эвклид и Аполлоний, интересовались кривыми, которые они называли коническими, потому что их можно было получить при помощи плоского сечения правильного конуса вращения. Свойства этих кривых они изучали с большой тщательностью. При этом они руководствовались, повидимому, лишь чистой любознательностью, ибо их кривые были применены только через 2000 лет Кеплером и Декартом: первый применил их в астрономии, сформулировав законы эллиптического движения планет и подготовив, таким образом, труд Ньютона, а второй — благодаря глубокому знанию свойств конических кривых — при разрешении проблемы, поставленной Кеплером в связи с законом преломления света, и проблемы идеального диоптра, исключительно точно воспроизводящего изображение точки, находящейся в бесконечности, как, например, звезды.

Еще более непредвиденные применения относятся к числам, которые алгебраисты XVII в. называли мнимыми и которые были ими введены для решения уравнений второй степени и затем, как показал Даламбер, уравнений любой степени. Алгебраисты того времени и не предполагали, что эти мнимые числа доставят современным инженерам, работающим в области электричества, наиболее простой способ разрешения проблем, которые ставятся техникой переменных токов. Современная физика и, в частности, волновая механика этими сложными числами пользуются постоянно.

Так же обстоит дело и с теорией групп — разделом математики, который развился особенно после работ Эвариста Галуа, умершего в 1831 г. в возрасте всего лишь 20 лет. Эта теория, первоначальной целью которой было более глубокое освещение механизма алгебры и всего того, что относится к решению алгебраических уравнений, впоследствии исключительно разрослась и теперь находит свое применение во всех областях математики и физики: в геометрии, в кристаллографии, в теории квант, в теории относительности, в которых без понятия группы обойтись просто невозможно. В специальной теории относительности, например, фундаментальную роль сыграла группа преобразований, которую мы называем группой Лоренца. Эли Картан показал, каким образом понятие группы разъясняет все, что относится к трудностям общей теории относительности, благодаря которой гений Эйнштейна мог разрешить затруднения, оставленные нам небесной механикой Ньютона, и совершенно по-новому подойти к разрешению проблемы тяготения и строения вселенной.

Теория относительности, дающая нам наиболее удовлетво-

рительное представление о мире (из всех до сих пор созданных представлений), пользуется не только теорией групп, но и другими частями математики, которые в прежние времена были разработаны без всякого предвидения их возможных применений. Таковы, например, теория тензоров, которая в настоящее время дает физике наиболее гибкое и наиболее точное средство представления величин; таковы неэвклидовы и неримановы геометрии, построенные математиками исключительно с целью обобщения и разъяснения. Весьма примечательно, что эти наиболее обобщенные геометрии — первоначально нашедшие применение в физике и позволившие глубоко объединить две науки: физику и геометрию, которые до того были независимыми, — недавно нашли применение также и в электротехнике. За несколько лет до второй мировой войны я участвовал в жюри, изучавшем и оценивавшем работы кандидатов на премию Монтефиоре. Мы единогласно присудили первое место американскому инженеру Габриэлю Крону, который показал, каким образом использование наиболее обобщенных геометрий и матричного исчисления, тесно связанного с тензорным исчислением, позволяет упростить и обобщить разрешение проблем электротехники, связанных с конструкцией и расчетом машин постоянного или переменного тока.

Я расскажу вам историю майора Мак-Магона, занимавшегося теорией чисел, точнее — трудной проблемой магических квадратов. Когда его спросили, почему он предпочитает этот раздел, он, не желая, чтобы практическое употребление испортило результаты умственной деятельности, ответил: «Потому, что это единственная часть математики, которая ничему не может служить». Он умер до того, как ему пришлось бы с сожалением констатировать, что эти магические квадраты доставляют наиболее простое средство разрешения проблем рисунков, которые ставятся техникой жаккардовских станков. Жорж Тейссье сказал мне, что они чрезвычайно полезны также и в разрешении сельскохозяйственных проблем, например проблемы севооборота.

Если, таким образом, любое усилие мысли оплодотворяет действие, то в свою очередь развитие техники предоставляет к услугам науки все более и более мощные средства воздействия, без которых многие современные исследования оказались бы невозможными. Таковы, например, циклотрон, позволяющий производить ядерные превращения, сталкивая атомные ядра одно с другим, или большой электромагнит Белльвю; эти установки используют мощные электрические токи, которые могут им доставлять только современные большие центральные электрические станции. Развитие металлургической промышленности, работающей в непосредственной связи с исследовательскими лабо-

раториями, позволило создать новые сплавы, упругие, термические или магнитные свойства которых непрестанно дают науке новые средства для исследований. Таким образом, мы констатируем все более и более тесную солидарность, все более и более глубокую связь между наукой и техникой, между современными формами мысли и действия.

От действия к мысли. Мне хотелось бы рассмотреть более историческую точку зрения и показать, каким образом прогрессивно расширялась область мысли, как увеличивалось проникновение научного духа во все области человеческого действия и познания, а также показать всю важность роли ученых в материальном и моральном развитии человечества. Как сказал Гете, вначале было действие, необходимое для поддержания жизни. И именно действие продвигало мысль ко все более и более ясным и сознательным формам — по мере того, как увеличивалась сложность живых существ и их групп; мысль приняла свои наиболее развитые формы в человеческом роде.

Во время оккупации Франции, когда я проживал в Труа, ожидая окончания тяжелых испытаний, я получил от моего дорогого Анри Валлона его прекрасную книгу, написанную им во время вынужденного бездействия в его уединенной жизни, «От действия к мысли». В этой книге он излагает онтогенический аспект этой эволюции и показывает, каким образом ребенок постепенно поднимается, как когда-то делали наши предки, до овладения системой символов и концепций, которые при помощи языка позволяют нам создавать все более и более адэкватное представление о действительности.

С этой точки зрения, человечество было достаточно богатым уже тогда, когда несколько тысяч лет назад так называемая логическая мысль воистину осознала самое себя и когда стала возможной наука, достойная этого имени. Первой задачей этой логической мысли и науки, которую она сделала возможной, было — в аспекте, прежде всего, философском и математическом — наведение порядка в сокровище познаний, медленно и постепенно приобретенных в течение веков.

Для нашей культуры эту задачу осуществила античность — и особенно греки. Они сконструировали мировые системы, как, например, системы Демокрита, Эпикура и Лукреция, целью которых — с точки зрения как моральной, так и научной — было рациональное объяснение явлений, направленное на освобождение людей от страха путем создания связного представления о вселенной. Прежде всего, согласно статической концепции греков, речь шла об организации, систематической и прочной, достижений прошлого опыта, в которых размышление, в особенности дедуктивное, находило исключительно богатый и, казалось, неисчерпаемый материал.

Первоначальная плодотворность использования накопленных в древние времена богатств привела впоследствии к созданию схоластической иллюзии о том, будто мысль может сама из себя извлечь существенное в понимании и представлении о вселенной. Согласно концепции Платона, разум находился в сообщении (хотя бы при помощи только теней) с предсуществующим миром идей и мог бесконечно черпать в нем знания, не считая необходимым постоянно прибегать к наблюдению или опыту.

Дуалистическая концепция, противопоставляющая дух телу, разум — материи, мир идей — миру чувственных впечатлений, повидимому, сама по себе была только отзвуком той социальной структуры, в которой свободный человек противопоставлялся рабу, умственная деятельность — физической, мысль — действию.

Это ограничение мысли в себе самой долго продолжалось еще и после того, как она исчерпала содержание опыта предков. После древнегреческих философов-материалистов потребовалось две тысячи лет, чтобы мысль согласилась — устанавливая экспериментальный метод — снова войти в контакт с материей и чтобы она могла себя чувствовать все более и более солидарной с действием. Идеалистическая иллюзия весьма цепка: через 300 лет она еще воодушевляет философию Гегеля, считавшего возможным вывести из мысли реальное; она существует еще и в настоящее время — в наших предрассудках об иерархии активностей, все еще поддерживаемой, впрочем, существованием социальных классов. Введение экспериментального метода, все более и более сознательное его применение ко всем наукам, относящимся к природе и человеку, действительно, отмечает начало новой эры — эры, в которой все больше и больше подтверждается плодотворность тесного союза мысли и действия, а также обязанность ученого ставить вопросы действительности все более точно и глубоко и чувствовать себя все более и более солидарным с другими людьми в их материальной и моральной жизни. Мысль, возникшая из потребности действия, отмечает, таким образом, свое историческое возвращение к действию.

Эта эволюция, хотя еще и незавершенная, происходит постепенно, этапами. Работа мысли над фактами (а не над идеями, приобретенными человечеством в течение столь долгого времени, что эти идеи кажутся нам данными априори и образующими совершенно отдельный мир) была ограничена, прежде всего, областью естественных наук до того, как она распространилась на то, что́ мы сейчас называем гуманитарными науками.

Возвращение к действию. По мере того как расширялось поле применения физических и естественных наук, постепенно стиралась разница — сперва очень резкая — между чистой наукой и наукой прикладной, между ученым и инженером или техником.

Их методы работы и их формирование имеют тенденцию все более и более сближаться. Более интимный контакт между ними устанавливался в исключительных случаях, например в периоды войн, во время которых к ученым обращались всегда, если таковые были. Так, Архимед — один из наиболее великих ученых древности, одновременно занимавшийся в значительной мере проблемами техники, — сумел, согласно легенде, поджечь римский флот под Сиракузами при помощи зеркал. В более близкое к нам время ученые оказали существенные услуги нашей стране во время войн французской революции. Получением селитры, необходимой для производства пороха, разрешением различных проблем металлургии, поставленных настоятельной потребностью в создании вооружения, мы обязаны таким ученым, как Бертоле и Монж.

Во время войны 1870 г., несмотря на ее непродолжительность, было сделано несколько новых попыток в применении науки к действию. В своей книге «Наука и философия» Марселен Бертело рассказывает, что во время осады Парижа он руководил опытами по телеграфным сношениям с внешним миром, используя Сену в качестве проводника, однако результат, повидимому, был не вполне удовлетворительным.

Период, последовавший за войной 1870 г., не уменьшил того расстояния, которое отделяло ученого от техника, хотя первый существенно помогал успехам второго. Понятие о чистом ученом сохраняло всю свою силу, весь свой несколько отшельнический характер, не лишенный величия, — в мире, предавшемся культу денег, в котором открытия «чистой» науки нередко представляли собой источники значительных доходов для тех, кто их применял на практике. Ни Пастер, ни Бертело, работы которых имели столь значительные технические следствия, не искали материальной выгоды. Открыв радиоизлучение, Пьер и Мария Кюри и не подумали «защитить» применение своего открытия (согласно техническому термину), «заинтересоваться этим» в буржуазном смысле этого слова. И те и другие считали, что погоня за личной выгодой уменьшает ценность результатов их труда.

Я позволю себе, в бесконечно более скромных размерах, привести здесь пример из своей личной жизни. В начале моей карьеры, вскоре после 1900 г., я вместе с моим препаратором Марселем Муленом, преждевременно погибшим в битве на Марне, сконструировал аппарат для автоматического измерения и регистрации ионов атмосферы. Чтобы построить этот достаточно сложный аппарат, я обратился к одному конструктору, который затем поставил некоторое количество экземпляров метеорологическим обсерваториям. Мне даже и в голову не пришло требовать от него «аванса», которого, впрочем, он мне и не предложил. Несколько лет спустя я узнал от одного нашего общего прияте-

ля, что этот конструктор так выразил свое впечатление по этому поводу: «Да, это действительно настоящий ученый». Это была его концепция, — а также и наша. Совершенно очевидно, что такая позиция лучше, чем противоположная. Как я только что указал, поиски немедленных результатов и соответствующей прибыли не являются действительно благотворным источником практических применений науки. У нас теперь начинают понимать, что коллективная организация должна одушевиться именно таким убеждением и разработать действительную политику науки, чтобы наука оказывала обществу максимум услуг, на которые она способна.

Состояние умов в научной среде, концепция отношений между наукой и техникой значительно изменились после войны 1914 г., во время которой большинство ученых нашей страны было призвано к работе для военных целей. Их усилия дали интересные результаты в различных направлениях. Так, техника ламповых усилителей, имеющая сейчас столь широкое распространение, получила свой решающий толчок в работах замечательной бригады, которую генерал Ферье сумел создать в своей лаборатории, сделавшейся впоследствии национальной радиоэлектрической лабораторией.

Физики и математики также интересовались тогда трудной проблемой обнаружения артиллерийских батарей при помощи звука. Решения этого вопроса давались самые различные; некоторые из них, перенесенные в область герцевских волн, получают сейчас благодаря катодному осциллографу мирное применение в радиоуправлении судами и самолетами. Не остались безучастными к этим вопросам и химики. Как только появилась угроза газовой войны, они объединились для совместных исследований, и наиболее знающие из них проделали плодотворную работу в отыскании и быстрейшем осуществлении средств противогазовой защиты.

Укажу также и на технику ультразвуков, в развитии которой я участвовал в меру своих сил и которая, повидимому, сыграла, под именем «сонар», значительную роль в недавних морских боях. Эта техника обнаружения подводных лодок при помощи эхо является для подводного пространства и ультразвуковых волн тем, чем является более новый «радар» (радиолокация) для воздушного пространства и герцевских волн. Применения этих двух технических достижений в мирных условиях развиваются довольно быстро; точно так же исключительно широко распространяются применения пьезоэлектричества, первый пример которого мною был дан еще более 30 лет назад.

После четырех лет первой мировой войны, которые сильно сблизили ученых с техниками, промышленность обратилась с призывом к ученым — продолжить в мирное время ту работу,

которую они выполняли во время войны. Единственным средством противодействия уходу из лабораторий — что могло бы произойти в результате этого — было повышение уровня научного формирования будущих техников. Надо было понять, что, с этой точки зрения, в сущности нет никаких оснований проводить различие между «чистой» и прикладной наукой. Одно и то же образование годится и для того и для другого: овладение экспериментальным методом позволяет обращаться с вопросами к природе в лаборатории и устранять на заводе трудности при эксплоатации какого-либо технического процесса. Тот факт, что университеты пополняют свой состав и все более и более развивают институты и технические школы, очень хорошо подтверждает указанную нами мысль.

Примером этого является Школа физики и химии, которую я имею честь возглавлять. В 1925 г. она была присоединена к Парижскому факультету наук и с тех пор воспитывает одновременно и научных исследователей (как их сейчас называют) и инженеров. Мы не проводили разницы между подготовкой одних и других: индивидуальные способности и вкусы каждого определяют его дальнейшее направление.

То, что я сказал относительно роли, которую сыграли ученые в войне 1914 г., еще более верно для последней войны. Вы знаете, как в настоящий момент во всех странах ученые беспокоятся о том употреблении, которое будет сделано из новых и могущественных средств действия, переданных ими в распоряжение людей. В этом — один из путей, при помощи которых наука приходит к политике и ввиду которых мысль оказывается вынужденной воссоединиться с действием.

Общественная роль ученого. Другой путь, по которому происходило это сближение, — путь развития гуманитарных наук: экономических, исторических, юридических и психологических, путь применения научного метода к тому, что касается самого человека и взаимоотношений между людьми.

Одновременно с расширением концепций науки расширялась и концепция роли, которую мог играть ученый в человеческом обществе, его обязательств по отношению к обществу. Это движение — более чем через 100 лет последовавшее примеру Вольтера, Кала, Лалли-Толлендаля, Сирвена и несчастного Шевалье де ля Барр — началось у нас в плане индивидуальной юстиции «делом Дрейфуса», чему минуло уже 50 лет. «Дело Дрейфуса» нельзя забывать уже хотя бы только потому, что оно сыграло исключительно большую роль в истории нашей республики.

Чтобы прикрыть преступные действия и держать невиновного на каторге, инициаторы суда призвали в качестве ложного предлога национальный интерес. Люди мысли — «интеллигенты», как их тогда называли в презрительном смысле, поднявшие с тех

пор это название в качестве своего знамени, бросились к действию под предводительством юристов — таких, как Трарье или Прессансе, историков — как Жорес или Олар, философов — как Габриэль Сеай или Виктор Баш, писателей — как Эмиль Золя или Анатоль Франс, педагогов — как Фердинанд Бюиссон, математиков — как Поль Пенлеве или Жак Адамар, химиков — как Гримо, биологов — как Эмиль Дюкло.

Молодежь, которой мы тогда были, приняла в этой борьбе самое горячее участие. Эта борьба, закончившаяся триумфом справедливости, правда запоздалым, оставила в нашей стране глубокие следы. Одним из продолжений этого «дела», как мы тогда говорили, было создание Лиги прав человека, которая признала своей задачей, прежде всего, защиту индивидуумов от произвола власти. В повседневной деятельности Лиги принимали участие больше всего люди мысли, потому что центральный комитет этой Лиги в большинстве своем состоял из университетских работников — таких, как математики, мои друзья Эмиль Борель и Жак Адамар, этнограф и лингвист Поль Риве. Я сам имел честь председательствовать в Лиге, приняв это место от человека, имя которого является символом необходимого союза между мыслью и действием, — от Виктора Баша. Этот человек, в течение 50 лет — со времени «дела Дрейфуса» — выполнявший работу одновременно в области философии и эстетики, боролся за правосудие всю свою жизнь, пока она не оборвалась трагической, но вместе с тем достойной его храбрости смертью: вместе со своей женой Виктор Баш оказался жертвой гнусного убийства в Лионе. Виктор Баш сам с гордостью вспоминал те обстоятельства, при которых, примерно 50 лет назад, ему открылся тот долг, которому он отдал лучшую часть самого себя. Вот что он говорил: «Тогда во мне произошло удивительное явление. Я, который до того времени, честно говоря, не испытывал никакого общественного чувства и жил только для себя, для своего образования, для своих книг и своей семьи, состоявшей в то время из меня одного, — я почувствовал себя переменившимся. Как жить с сознанием этого чудовищного неравенства? Нельзя — если ты не сообщник каких-либо грязных дел — не пожертвовать всего своего запаса энергии, разума и силы действия для борьбы против неравенства. Разве не было моей обязанностью пожертвовать этой задаче всем, что у меня было дорогого: личным спокойствием, спокойствием моей семьи, моим положением в обществе и даже собственной жизнью?»

Он принес эту жертву, значение которой все более и более увеличивалось, по мере того как расширялось понятие правосудия, за которое мы сражались. Вначале речь шла только об одном несправедливо осужденном человеке. Но когда глаза откры-

лись однажды на индивидуальный случай несправедливости, закрыть их уже было нельзя — взору открывалось все нагромождение социальных или международных несправедливостей. Как можно спокойно жить в мире, где еще возможны репрессии, подобные той, которая произошла в течение недавних лет? Как не видеть и не знать, что человечество производит на свет новый мир в не имеющих названия страданиях? Что можно думать о тех, чей эгоизм ведет их к преследованию корыстной цели или к поискам личной пользы — с полнейшим отсутствием чувства общественности, с бесконечно опасным безразличием и выжиданием?

Все более и более увеличивающееся число интеллигентов поняло тот долг, который на них возлагает фактическое положение в мире. После Лиги прав человека, — поле деятельности которой с момента окончания первой мировой войны расширилось до международных размеров и которая встала на борьбу против фашизма, — в 1934 г. образовался Комитет бдительности антифашистской интеллигенции, члены которого, к сожалению, не сумели разглядеть всей постигшей человечество опасности. И потребовались ужасные, только что пережитые нами, годы для того, чтобы родился наш Национальный союз интеллигентов, часть которого составляет Французский университетский союз. Этот союз должен объединить всех, кто понял свой долг.

Позвольте мне, старому человеку, еще раз сослаться на свой личный опыт, восстановить путь, который привел меня к выполнению, в меру моих сил и способностей, разнообразных задач и на всем протяжении которого я имел возможность неоднократно убеждаться в том, насколько проще выполнить свой долг, чем его познать.

Таким образом, я оказался вовлеченным в слишком обширную область деятельности, что до войны и оккупации ставили мне в упрек некоторые из моих лучших друзей, — не столько в интересах науки, которая могла обойтись и без меня, сколько в моих собственных интересах. Большинство из них изменили свое мнение и сейчас находятся с нами.

В начале 1898 г., когда невиновность Дрейфуса стала очевидной, я получил в лаборатории Кавендиша в Кембридже, где я тогда работал, письмо от Пеги, который, как и я, окончил Нормальную школу. В этом письме он просил меня присоединить мою подпись к подписям других молодых людей, увлеченных примером Жореса и Дюкло. Я ответил утвердительно и, возвратившись в Париж, весьма глубоко переживал вместе с Жаном Перреном и Эмилем Борелем те четыре или пять лет, которые были необходимы, чтобы добиться запоздалого правосудия. Но когда дело было доведено до конца, научное движение приняло такой размах, что мы почти полностью оказались

поглощенными им. Затем внезапно разразилась война 1914 г. с ее мобилизацией науки и вытекающими из этого задачами в области общественного и международного права. Публично я принял определенную позицию в момент забастовки транспортников в 1920 г. Часть печати считала тогда своей задачей рекомендовать студентам высших технических школ превратиться в механиков или в кочегаров на паровозах и в шоферов на автобусах. Дело дошло даже до того, что некоторые студенты просили — и в отдельных случаях получали — разрешение на временное прекращение лекций для того, чтобы облегчить проведение в жизнь указанного штрейкбрехерства. В этот момент я был директором учебной части в Школе физики и химии и с болью видел, как развертывается движение, которое имело тенденцию заставить нашу молодежь принять позицию, враждебную рабочим, с которыми им в дальнейшем пришлось бы жить и работать. Случай дал мне возможность сигнализировать об этой опасности в открытом, опубликованном письме. Это явилось причиной визита, нанесенного мне братом Андре Марти, который просил, чтобы я принял на себя защиту Андре Марти в знаменитом деле о восстании французских моряков в Одессе и заявил об этом на большом публичном собрании в зале Ваграм. А дело было в следующем. В нарушение всех правил международного права и без всякого повода, исключительно из желания притти на помощь белым армиям, наше тогдашнее правительство отправило флот в Черное море и бомбардировало Одессу. Протест моряков, восставших под руководством Андре Марти против интервенции, прекратил это нарушение международного права и тем самым спас честь нашей страны. Ознакомившись с карьерой Марти, являвшегося в то время главным механиком подводной лодки «Протей», я впервые согласился выступить на собрании подобного рода. Мое решение окрепло сразу же, когда я, прибыв в зал Ваграм, почувствовал общую атмосферу, и в особенности, когда увидел на трибуне Фердинанда Бюиссона, имевшего тогда уже около 80 лет от роду, и Огюста Пренана — профессора медицинского факультета, отца нашего Марселя Пренана. В тот момент я был экзаминатором в приемной комиссии Морской школы. И буквально на следующий день после собрания я получил письмо от начальника Морского генерального штаба адмирала Шверера, члена партии «Французское действие», как она тогда называлась. Шверер предложил мне подать в отставку. Я ответил тем, что отправил министру текст моего выступления... Вы знаете, что Андре Марти был арестован, затем судим в Тулоне и вскоре был освобожден под давлением народного мнения, выразившегося в том, что его выбрали депутатом и муниципальным советником в Париже.

Проблемы международного права, в особенности же проблемы мира, в последующие годы ставились все более и более остро. Химическая война играла в то время такую же роль, какую сейчас играет боязнь атомной войны. И я, ввиду растущей опасности развития средств разрушения, угрожавшей человечеству в течение долгих лет, старался пропагандировать убеждение в том, что установить мир может и должна лишь воля народов. Эту деятельность я продолжал до победы фашизма в Германии, принесшего народам мира смертельную опасность, включая и опасность войны, но значительно превосходя ее, потому что опасность фашизма проявлялась не только во-вне — в угрозах против мира, но и внутри нашей страны, угрожая нашим свободам и поддерживая устарелый экономический порядок. Опасность, которую представлял собой фашизм, начиная с 6 февраля 1934 г., сделалась очевидной для всех. Проводить прогрессивную деятельность оказалось исключительно сложно — и особенно для тех, кто понял общую причину внешних и внутренних трудностей. В известной мере, я более остро, чем многие другие, реагировал на происходящие события. Это было обусловлено, между прочим, и тем, что я пребывал в Китае как раз в момент японской агрессии в Маньчжурии в 1931 г., глубоко переживая это событие вместе с китайским народом. Я принадлежал к людям, которые все более и более остро реагировали также на события в Эфиопии, Испании, Австрии и Чехословакии. Однако наиболее тяжелыми часами в моей жизни я считаю то время, когда мне пришлось в Комитете бдительности антифашистской интеллигенции бороться против тех, в большинстве случаев имевших хорошие намерения, кто считал возможным одновременно и бороться с фашизмом в нашей стране и сотрудничать с ним во внешних делах — во имя слепого, пагубного пацифизма. Такая политика стоила нам успеха Франко в Испании и позора Мюнхена.

После этого мы скатились на дно пропасти: угроза Польше, смехотворная война, отказ умирать за Данциг и предательство. И, наконец, — наше освобождение и восстановление, которое необходимо сделать действительно эффективным. Необходимо сказать, что в последние два года я нашел большую поддержку своим убеждениям; необходимость приблизить научную мысль к политическому или социальному действию теперь понята очень многими учеными, желающими всеми своими силами содействовать созданию лучшего и более справедливого мира.

* * *

В заключение я хотел бы вернуться к утверждению необходимой связи между наукой и жизнью, между мыслью и дей-

ствием. Долг ученого — оставаться в контакте с другими людьми даже в отношении плана науки, не придавать науке слишком отвлеченного характера, что могло бы вырыть пропасть между представителями науки и большей частью человечества. В этом — одна из трудных задач; она еще осложняется тем, что быстрота, с которой развивается наша наука, настолько значительна, что мы сами едва поспеваем за ней. Но если бы случилось так, что в радости познания и возможности действия могли бы принять участие только несколько избранных, тогда человечество встретилось бы с еще большей опасностью.

Правительство ученых, о котором думал Ренан, в действительности было бы столь же опасным, как и всякая диктатура одного человека или олигархии. Опыт показывает, что человек, располагающий исключительной властью — политической или финансовой, — теряет чувство равновесия: ученые не стали бы исключением и также сделались бы опасными сумасшедшими. Нужно, следовательно, к нашему усилию строить науку присоединить усилие сделать ее доступной народу и притом настолько, чтобы человечество могло следовать по своему пути сомкнутым строем — без убежавшего вперед авангарда и без влачащегося позади арьергарда. Нам нужно поддерживать контакт с народными массами; и я глубоко убежден в возможности выполнить этот долг распространения истинной науки, долг, который возлагается на нас, ученых, в качестве одного из аспектов нашего социального действия. Таким образом, мы могли бы вложить свою долю участия не только в материальное, но и в духовное освобождение человечества.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *Г. Сульженко*

*

Технические редакторы *А. Никифорова*
и Б. Викторов

*

Корректор *К. Иванова*

*

Сдаио в производство 8/IX 1949 г.
Подписаио к печати 3/XI 1949 г.
А-14716. Печ. л. 27½+вклейки ½ п. л.
Уч.-изд. л. 29,2. Формат $60\times92^{1}/_{16}$. Изд. № 9/434
Цеиа 26 р. 50 к. Зак. № 1322

20-я типография „Союзполиграфпрома"
Главполиграфиздата
при Совете Министров СССР
Москва, Ново-Алексеевская, 52

18

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
128	6 св.	законов N	законов
256	8 „	В камере Вильсона на толстоелойных	В камере Вильсона, на толстослойных
355	14 „	$\frac{c}{\nu} = \frac{h}{me}$	$= \frac{c}{\nu} = \frac{h}{mc}$
355	11 „	$= \frac{h}{m\nu}$	$= \frac{h}{mv}$

Зак. 1322